

# Proyecto Fin de Máster

## Máster en Sistemas de Energía Térmica

### Estado del arte de Sistemas de Energía Térmica a alta temperatura basados en cloruros

Autor: Alejandro Loizaga Barea

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

**Dep. de Ingeniería Energética**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Proyecto Fin de Máster  
Máster en Sistemas de Energía Térmica

# **Estado del arte de Sistemas de Energía Térmica a alta temperatura basados en cloruros**

Autor:  
Alejandro Loizaga Barea

Tutor:  
Francisco Javier Pino Lucena  
Profesor Titular de Universidad

Dep. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Carrera: Estado del arte de Sistemas de Energía Térmica a alta temperatura basados en cloruros

Autor: Alejandro Loizaga Barea

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*





# Agradecimientos

---

A mis padres, mi hermano, mi hermana y mi familia, por apoyarme durante todos estos años, por su apoyo incondicional y todo su cariño. Todo esto lo he conseguido gracias a ellos.

A mis amigos, que han sabido siempre apoyarme y estar en los buenos y malos momentos, también se lo debo.

A mi tutor, por permitirme realizar este proyecto, aconsejarme y ayudarme en este estudio llevado a cabo.



El objetivo de este proyecto es realizar un estado del arte relativo a las sales fundidas en base de cloruro para sistemas de energía térmica de alta temperatura.

En primer lugar se realiza una introducción, con el objetivo de dar una idea de cuales son los diferentes tipos de centrales termosolares que existen, explicando en que consisten cada una de ellas y una descripción de los rangos de temperatura en los que se suele trabajar junto con una comparativa donde se proporciona información acerca de las desventajas y ventajas de cada una de estas tecnologías. Seguidamente se habla de los sistemas de almacenamiento de energía y su interés.

Luego se habla sobre los fluidos caloportadores mas usados por la industria térmica, describiéndolos e indicando las ventajas y desventajas de cada una de ellas. Seguidamente dirigimos el estudio hacia las sales en base de cloruros, haciendo una comparativa entre las diferentes sales de cloruro y sus propiedades térmicas y también veremos cuales se utilizan en la industria actualmente o cuales se están estudiando con intención de emplearlos en un futuro en instalaciones térmicas.

Finalmente se realiza un estado del arte donde se recoge con mucho detalle toda la información disponible acerca de las diferentes sales en base de cloruro que se están estudiando y las pruebas que se están realizando, y al final de este mismo apartado se proporcionará una tabla resumen con todas las propiedades y características de las diferentes sales en base de cloruro que se han visto en este documento.



# Abstract

---

The objective of this project is to realize a state of the art related to molten salts based on chloride for high temperature thermal energy systems.

First, an introduction is made, with the aim of giving an idea of which are the different types of solar thermal power plants that exist, explaining what each one consists of and a description of the temperature ranges in which they usually work together with a comparison where information about the disadvantages and advantages of each of these technologies is provided. Next, we talk about energy storage systems and their interest.

Then we talk about the heat transfer fluids most used by the thermal industry, describing them and indicating the advantages and disadvantages of each of them. Then we direct the study to the salts based on chlorides, making a comparison between the different chloride salts and their thermal properties and we will also see which are currently used in the industry or which are being studied with the intention of using them in the future in thermal installations .

Finally, a state of the art is made where all the available information about the different chloride based salts that are being studied and the tests that are being carried out are collected in great detail, and a summary table will be provided at the end of this section. with all the properties and characteristics of the different salts based on chloride that have been seen in this document.

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1.	<i>Tipos de centrales</i>	2
1.1.1	Centrales de colectores cilindro parabólico (CCP)	2
1.1.2	Centrales de Receptor central o torre	3
1.1.3	Centrales de disco parabólico	4
1.1.4	Centrales Solares con tecnología Fresnel	4
1.1.5	Comparativa tecnologica	5
1.2.	<i>Sistemas de almacenamiento de energía en plantas solares</i>	7
1.2.1	Almacenamiento de calor sensible	7
1.2.2	Almacenamiento de calor latente	8
1.2.3	Almacenamiento de calor químico	8
<b>2</b>	<b>Ventajas e inconvenientes</b>	<b>9</b>
2.1.	<i>Aceites térmicos</i>	10
2.2.	<i>Sales fundidas</i>	10
2.3.	<i>Vapor de agua</i>	11
2.4.	<i>Aire o gas</i>	11
2.5.	<i>Sodio</i>	12
2.6.	<i>NaK</i>	12
2.7.	<i>Conclusiones</i>	13
<b>3</b>	<b>Comparativa sales de cloruros y carbonatos</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Estado del arte</b>	<b>19</b>
4.1.	<i>Introducción</i>	19
4.2.	<i>Fluidos térmicos</i>	19
4.3.	<i>Cloruro de aluminio (<math>\text{AlCl}_3</math>)</i>	22
4.4.	<i>Cloruro de zinc (<math>\text{ZnCl}_2</math>)</i>	23
4.5.	<i>Cloruro de hierro (<math>\text{FeCl}_3</math>)</i>	24
4.6.	<i>Cloruro de sodio (<math>\text{NaCl}</math>)</i>	25
4.7.	<i>Cloruro de potasio (<math>\text{KCl}</math>)</i>	27
4.8.	<i>Mezcla de <math>\text{NaCl}</math> + <math>\text{AlCl}_3</math></i>	28
4.9.	<i>Mezcla de <math>\text{KCl}</math> + <math>\text{AlCl}_3</math></i>	32
4.10.	<i><math>\text{NaCl}</math> + <math>\text{KCl}</math> + <math>\text{AlCl}_3</math></i>	34
4.11.	<i><math>\text{NaCl}</math> + <math>\text{KCl}</math> + <math>\text{AlCl}_3</math></i>	35
4.12.	<i>Otros estudios</i>	38
4.13.	<i>Resumen</i>	48
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>50</b>
	<b>Referencias</b>	<b>52</b>
	<b>Glosario</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Propiedades térmicas de los fluidos caloportadores.	10
Tabla 2. Comparación de las propiedades termofísicas y los precios a gran escala de las sales fundidas consideradas comúnmente como materiales TES y HTF en CSP.	15
Tabla 3. Comparación de propiedades termofísicas y los precios a gran escala de cloruros simples y mezclas de cloruros.	17
Tabla 4. Temperaturas de fusión de mezclas de cloruro binario eutéctico.	17
Tabla 5. Nombre, Fórmula, temperatura de fusión y temperatura máxima de degradación de las sales mencionadas.	21
Tabla 6. Densidad de la sal fundida de NaCl + AlCl <sub>3</sub> (% en moles).	29
Tabla 7. Viscosidad de NaCl + AlCl <sub>3</sub> líquido (% en moles).	30
Tabla 8. Presión de vapor de NaCl + AlCl <sub>3</sub> (% en moles).	31
Tabla 9. Densidad de KCl líquido + AlCl <sub>3</sub> (% en moles).	32
Tabla 10. Presión de vapor del líquido KCl + AlCl <sub>3</sub> .	33
Tabla 11. Densidad de NaCl líquido + KCl + AlCl <sub>3</sub> (% en moles).	35
Tabla 12. Densidades de la sal fundida 20% NaCl + 20% KCl + 60% ZnCl <sub>2</sub> (% por mol).	36
Tabla 13. Viscosidad de la sal fundida 20% NaCl + 20% KCl + 60% ZnCl <sub>2</sub> (% por mol).	36
Tabla 14. Resumen de la disponibilidad de propiedades físicas de AlCl <sub>3</sub> , ZnCl <sub>2</sub> , FeCl <sub>3</sub> , NaCl, KCl y sus mezclas.	38
Tabla 15. Temperatura de fusión y calor de fusión de algunas sales.	38
Tabla 16. Composiciones de sal fluorada.	39
Tabla 17. Composiciones eutécticas de cloruros.	40
Tabla 18. Composiciones de hidróxidos y nitratos.	41
Tabla 19. Composiciones salinas a base de carbonatos y algunas otras sales.	42
Tabla 20. Propiedades termofísicas de algunas composiciones de sal extraídas.	43
Tabla 21. Propiedades termofísicas de algunas composiciones de sales.	43
Tabla 22. Temperatura de fusión, temperaturas de solidificación y calores de fusión de algunos compuestos y composiciones a base de nitratos y nitritos.	44
Tabla 23. Valores opcionales de los coeficientes en la ecuación (1), para la determinación de la conductividad térmica de los cloruros y bromuros de metales alcalinos.	45
Tabla 24. Resumen de propiedades térmicas de las sales de cloruros y mezclas.	48



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Esquema básico de funcionamiento de un CET.	2
Figura 2. Colector cilindro parabólico.	3
Figura 3. Planta piloto con colectores Fresnel ubicada en la plataforma solar de Almería	3
Figura 4. Esquema de una central tipo torre y campo de helióstatos.	4
Figura 5. Disco parabólico.	5
Figura 6. Principales características de las centrales solares de concentración.	6
Figura 7. Estimación de costes para las tres principales tecnologías solares.	7
Figura 8. Esquema de funcionamiento de una central solar con receptor central.	9
Figura 9. Presión de vapor de sales de cloruro único.	18
Figura 10. Diagramas de fase de mezclas binarias y ternarias de sales iónicas y haluros covalentes.	20
Figura 11. Propiedades de la sal fundida de $\text{AlCl}_3$ a diferentes temperaturas.	23
Figura 12. Propiedades de la sal fundida de $\text{ZnCl}_2$ .	24
Figura 13. Presión de vapor del $\text{FeCl}_3$ líquido.	25
Figura 14. Propiedades del $\text{NaCl}$ fundido frente a las temperaturas.	26
Figura 15. Propiedades del $\text{KCl}$ fundido frente a las temperaturas.	27
Figura 16. Propiedades de la mezcla de sal fundida $\text{NaCl} + \text{AlCl}_3$ .	32
Figura 17. Propiedades de la mezcla de sal fundida $\text{KCl} + \text{AlCl}_3$ .	34
Figura 18. Densidades de la mezcla ternaria $\text{NaCl} + \text{KCl} + \text{AlCl}_3$ en varias composiciones.	35
Figura 19. Propiedades de la sal (20% $\text{NaCl} + 20\% \text{KCl} + 60\% \text{ZnCl}_2$ (% por mol)).	36
Figura 20. Capacidad calorífica de la composición eutéctica $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_3$ obtenida utilizando una técnica de calorímetro de barrido diferencial.	46
Figura 21. La dependencia de la temperatura de la difusividad térmica del nitrato de sodio.	47
Figura 22. La dependencia de la temperatura de la conductividad térmica de algunos nitratos y sus composiciones.	47



# Notación

---

atm	Atmósfera
bar	Bares
cal	Calorías
CCP	Colector cilindro parabólico
CET	Central energética Termosolar
cm	Centímetros
$cm^3$	Centímetros cúbicos
cp	Capacidad calorífica a presión constante
CSP	Concentración de Energía Solar (Concentrating Solar Power)
DOE	Departamento de Energía (Department Of Energy (US))
Ec	Ecuación
EE.UU.	Estados Unidos
Ej	Ejemplo
g	Gramos
Hg	Mercurio
HTF	Fluido de Transferencia de Calor (Heat Transfer Fluid)
IEA	Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency)
I+D	Investigación y Desarrollo
j	Julios
k	Conductividad térmica
K	Kelvin
kg	Kilogramo
kJ	Kilojulios
kwe	Kilovatio eléctrico
kwh	Kilovatio hora
LCOE	Costo Nivelado de la Energía (Levelized Cost of Energy)
LMFBR	Reactores Reproductores Rápidos de Metal Líquido (Liquid Metal Fast Breeder Reactors)
m	Metros
mol	Moles
mm	Milímetros
Mw	Megavatio
Mwe	Megavatio eléctrico
Mwth	Megavatio térmico
N/A	No Disponible (Not Available)
p	Por
Pa	Pascales
PCM	Materiales de Cambio de Fase (Phase Change Materials)

PSA	Plataforma Solar de Almería
Pvap	Presión de vapor
Q	Calor
Reac	Reacción
s	Segundos
T	Temperatura
TES	Almacenamiento de Energía Térmica (Thermal Energy Storage)
Tm	Temperatura media
Tmax	Temperatura máxima
Tmelt	Temperatura de fusión
US	Estados Unidos (United States)
V	Volumen
W	Vatios
wt	Peso
XL	Extra grande
$\rho$	Densidad
$\mu$	Viscosidad
$\mu\text{m}$	Micrómetros
$\lambda$	Conductividad térmica
$\lambda\text{m}$	Conductividad térmica media
$\Delta T$	Diferencia de temperatura
\$	Dolares
°C	Grados celcius
%	Porcentaje
~	Similar
<	Menor que
>	Mayor que
/	División, separación
:	Dos puntos
;	Punto y coma
,	Coma
.	Punto

# 1 INTRODUCCIÓN

---

El avance de los países desarrollados se ha basado en el consumo masivo de los combustibles fósiles. Para los países en vías de desarrollo, las necesidades energéticas son aún más vitales si pretenden equipararse con países que disponen de unas infraestructuras y niveles de industrialización ya consolidados.

Los graves efectos medioambientales en el clima regional y global provocados por el actual sistema energético están haciendo que la sociedad esté tomando conciencia acerca de la necesidad de considerar cambios en dicho sistema. Estos cambios se dirigen hacia el desarrollo de sistemas más eficientes, hacia el fomento de una cultura de consumo más razonable, a la implantación de tecnologías energéticas que utilicen fuentes de energías renovables, etc., con el fin de lograr un modelo energético sostenible.

El sistema energético actual se caracteriza porque la mayor parte del consumo final de energía tiene lugar en forma de calor y trabajo, en muchos casos a través de electricidad como forma energética de alta calidad energética y gran comodidad de transporte. Esto, unido a la importancia de la energía solar como fuente de energía renovable, hace que las centrales termosolares, como sistemas generadores de energía eléctrica, adquieran gran relevancia de cara a asegurar las necesidades energéticas de una sociedad respetuosa con el medio ambiente.

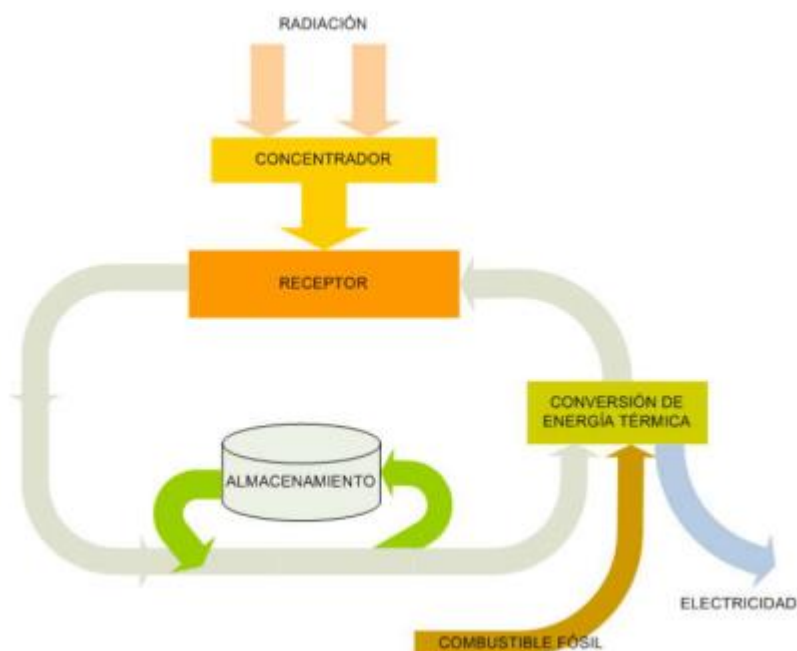
En general, una central termoeléctrica es un sistema capaz de generar energía eléctrica a partir de energía térmica mediante lo que se conoce como ciclo de potencia, y para poder desarrollar este ciclo se necesita una fuente de energía primaria a partir de la cual obtener la energía térmica necesaria.

Si la fuente de energía primaria es la energía química de un combustible fósil (carbón, gas o fuel-oil), la central termoeléctrica se denomina central termoeléctrica convencional. Si la fuente de energía primaria es la radiación solar, la central termoeléctrica se denomina Central Energética Termosolar (CET).

Al contrario que una instalación fotovoltaica, una CET no genera electricidad directamente a partir de la radiación solar, sino que transforma esta radiación en energía térmica que es aportada a un ciclo de potencia convencional y este transforma esa energía térmica en energía mecánica. Posteriormente, mediante un generador eléctrico se transforma la energía mecánica en energía eléctrica, siendo ésta última la que se inyecta a la red eléctrica y llega a los puntos de consumo.

Las CETs pueden incorporar un sistema de almacenamiento de energía, lo que permite seguir suministrando energía en ausencia de radiación solar. Dependiendo de la capacidad del sistema de almacenamiento, así será el intervalo de tiempo diario durante el cual se podrá seguir suministrando energía eléctrica.

Las CETs en las que la única fuente de energía es la radiación solar se califican como sistemas solo-solar. Si la radiación solar, como fuente de energía primaria, es complementada con el aporte energético de un combustible convencional, la central se denomina híbrida. En la **Figura 1** se representan los componentes básicos de una CET en la que se ha incluido un sistema de almacenamiento y un apoyo con combustible fósil. En realidad, únicamente el concentrador y el receptor son sistemas específicos de una CET y forman lo que se denomina campo solar, el resto son sistemas comunes para cualquier central termoeléctrica.



**Figura 1: Esquema básico de funcionamiento de un CET.**

El sistema concentrador está constituido por superficies reflectoras que interceptan, concentran y reflejan la radiación solar dirigiéndola hacia el receptor que se encarga de captar esta radiación concentrada e introducirla en el sistema. Como el objetivo es concentrar los rayos solares sobre la superficie del receptor, el sistema concentrador debe disponer de un mecanismo de control que le permita seguir la trayectoria del sol de modo que siempre se encuentre enfocado hacia él. Una vez que la radiación concentrada llega al receptor, éste la convierte en energía térmica mediante una transferencia de energía al fluido de trabajo. Por último, el sistema de conversión de energía térmica transforma esta energía en energía eléctrica.

Una característica diferencial de los sistemas termosolares es que la concentración de la radiación la realizan mediante reflexiones especulares, esto hace que únicamente sea aprovechable la componente directa de la radiación solar.

## 1.1. Tipos de centrales

Debido a la aplicación directa de las sales fundidas estudiadas en este Proyecto, es importante explicar las principales características de la tecnología solar de concentración a fin de conocer su funcionamiento y situar la importancia del almacenamiento de energía en estas centrales.

### 1.1.1 Centrales de colectores cilindro parabólico (CCP)

En este tipo de centrales el campo solar lo constituyen filas paralelas de colectores cilindro parabólicos (**CCP**), pudiendo cada fila albergar varios colectores conectados en serie. Cada colector está compuesto básicamente por un espejo cilindro-parabólico que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo receptor colocado en la línea focal de la parábola, es decir, concentran la radiación solar en dos dimensiones. Aunque el valor máximo teórico de la razón de concentración de un **CCP** está en torno a 200, en la práctica, los valores usuales de este parámetro están entre 30 a 80 veces.

Como consecuencia de la concentración de la radiación solar se produce un calentamiento del fluido que circula por el interior del tubo receptor.

Este tipo de sistemas pueden operar de manera eficiente calentando el fluido que pasa por su interior hasta temperaturas del orden de los 400°C. La **Figura 2** muestra los principales elementos de este sistema de concentración solar.

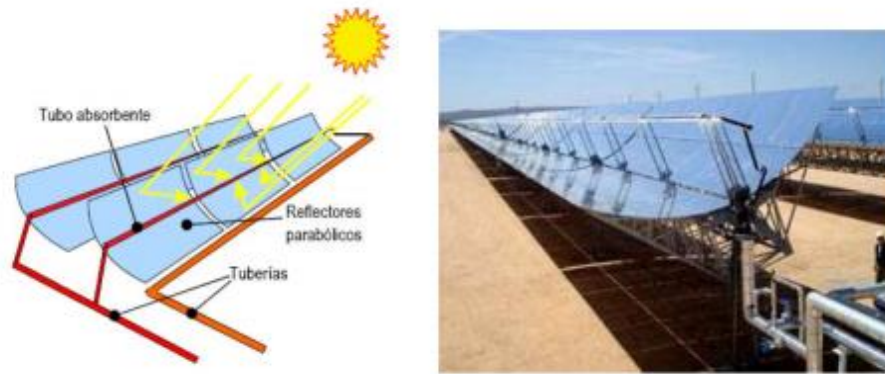


Figura 2: Colector cilindro parabólico.

### 1.1.2 Centrales Solares con tecnología Fresnel

La tecnología Fresnel utiliza reflectores planos, simulando un espejo curvo por variación del ángulo ajustable de cada fila individual de espejos, en relación con el absorbedor.

Los espejos paralelos enfocan la energía irradiada por el sol en un tubo, colocado a 8 metros por encima de los espejos, tal y como se observa en la **Figura 3**.

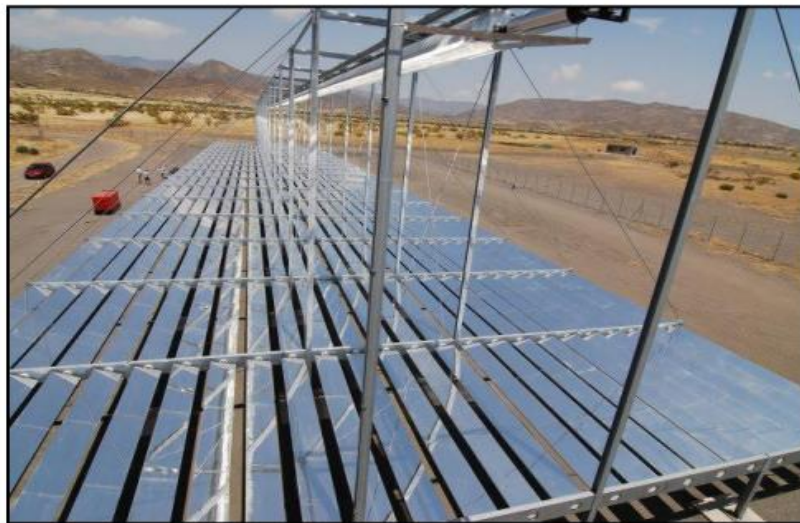


Figura 3: Planta piloto con colectores Fresnel ubicada en la plataforma solar de Almería [1].

El agua fluye a través del tubo de absorción, que se calienta a temperaturas de hasta 450°C produciendo vapor, el cual se convierte en energía eléctrica a través de una turbina.

Esta tecnología cuenta con mayores investigaciones cada año al presentar un gran potencial de desarrollo, las características más destacables son:

- Los concentradores se instalan a nivel del suelo, reduciendo la carga del viento y facilitando su limpieza y mantenimiento.
- El vapor se genera directamente y no se requiere de intercambiadores de calor.
- Presentan cero emisiones de  $CO_2$  y bajo requerimiento de agua (al refrigerarse por aire).
- El material utilizado en los reflectores son espejos de vidrio, por lo tanto su materia prima es muy barata.

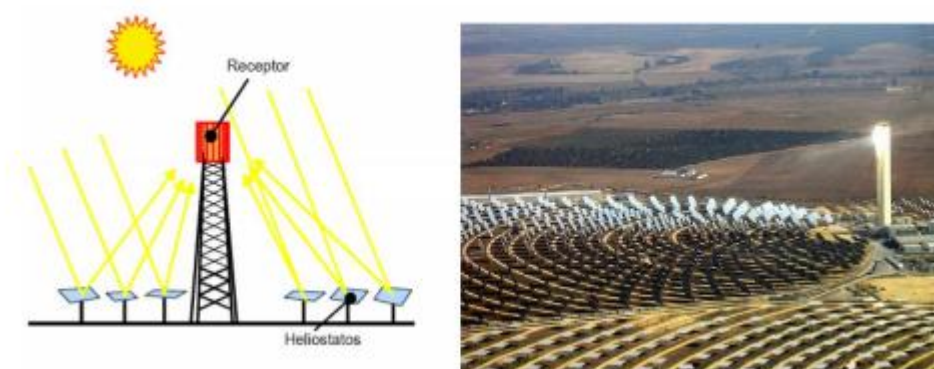
Recientes investigaciones, llevadas a cabo por R. Grena et al. [2] evalúan con buenos resultados el uso de la sal binaria solar 60%  $NaNO_3$  + 40%  $KNO_3$  en este tipo de centrales. Las expectativas son elevadas ya que la

sal se introduce en el colector central en el cual se concentra toda la radiación solar, obteniéndose un rango de trabajo en dicha sal de 290 a 550°C. La elevada temperatura de trabajo aumenta considerablemente el rendimiento de dicha central, aunque es necesario que ésta se adapte a los requerimientos de la sal, incluyendo un sistema de evacuación junto con un receptor secundario que permite aprovechar toda la superficie del mismo.

### 1.1.3 Centrales de Receptor central o torre

Consisten en un campo de helióstatos (espejos) que siguen la posición del sol en todo momento (elevación y acimut) y orientan el rayo reflejado hacia el foco colocado en la parte superior de una torre.

La **Figura 4** representa este tipo central. En este caso la concentración se realiza en tres dimensiones y no en dos como en los **CCP**, esto hace que el fluido de trabajo que circula por el receptor puede alcanzar temperaturas por encima de los 500°C. Los órdenes de concentración son de 200 a 1000 y las potencias unitarias de 10 a 200 MW.

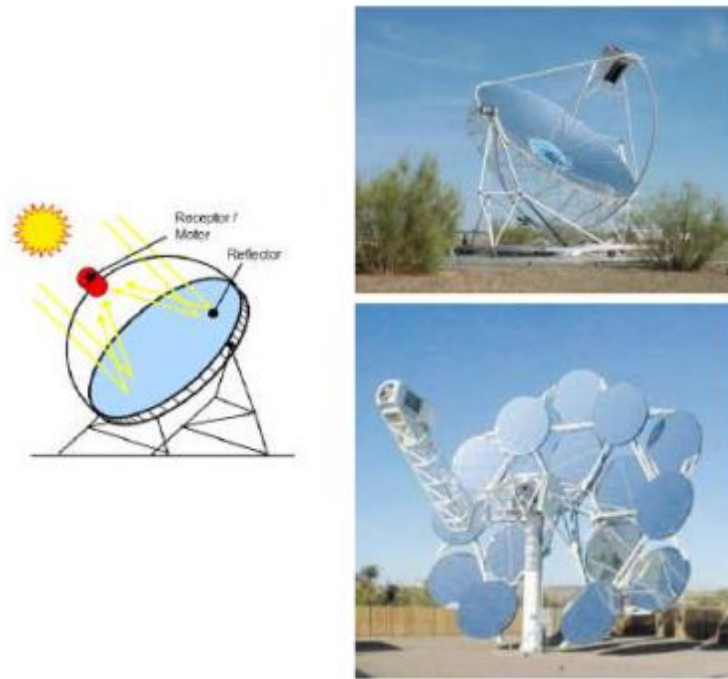


**Figura 4:** Esquema de una central tipo torre y campo de helióstatos.

### 1.1.4 Centrales de disco parabólico

Son pequeñas unidades independiente formadas por un reflector con forma de paraboloide de revolución que concentra los rayos en el receptor situado en el foco del paraboloide y que, a su vez, integra el sistema de generación eléctrica basado en un motor Stirling. Una variante de este tipo de centrales son las que en lugar de un reflector dispone de varios reflectores de modo que el conjunto forma una estructura que se asemeja a un paraboloide de revolución. La **Figura 5** representa ambas posibilidades.





**Figura 5: Disco parabólico.**

Al igual que en las centrales de receptor central, la concentración se realiza en tres dimensiones e incluso se alcanzan mayores concentraciones, esto permite trabajar con temperaturas de operación aún más elevadas, por encima de los  $700^{\circ}\text{C}$ . Los niveles de concentración pueden ir desde 1000 hasta 4000 y para tamaños de disco normales, en torno a los 10 m. de diámetro, las potencias unitarias van de 5 a 25 kWe.

Los sistemas de disco parabólico se caracterizan por su alta eficiencia, modularidad, autonomía de operación y capacidad de hibridación, no sólo con sistemas de energía convencional, sino también con otros sistemas termosolares.

De los cuatro tipos de CETs, el sistema de disco parabólico es el que ha alcanzado la mayor eficiencia pico de conversión (29,4%) de radiación solar en energía térmica.

### 1.1.5 Comparativa tecnológica

Las principales características de las tecnologías solares descritas, aparecen reflejadas en la **Figura 6** [3].

	Colectores Parabólicos	Receptor Central	Disco Parabólico	Línea Fresnel
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mayor desarrollo comercial con más de 16.000 millones de kWh de experiencia operativa; temperatura operativa potencial de hasta 500°C.</li> <li>■ Eficiencia neta anual de probado rendimiento de la planta del 14% (radiación solar a potencia eléctrica neta)</li> <li>■ Modularidad</li> <li>■ Buen uso del terreno</li> <li>■ La menor demanda de materiales</li> <li>■ Concepto híbrido probado</li> <li>■ Capacidad de almacenamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Buenas perspectivas para grandes eficiencias de conversión, temperatura operativa potencial de más de 1000°C</li> <li>■ Almacenamiento a altas temperaturas</li> <li>■ Posible operación híbrida</li> <li>■ Mejores para refrigeración en seco que en colectores y Fresnel</li> <li>■ Mejores opciones para usar en lugares no llanos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Eficiencias de conversión muy altas de más del 30%.</li> <li>■ Modularidad</li> <li>■ Integración de una forma más efectiva el almacenamiento térmico en una central térmica</li> <li>■ Experiencia operativa de primeros proyectos de demostración</li> <li>■ Fácil fabricación y producción en serie de las piezas necesarias</li> <li>■ No requiere agua para refrigerar el ciclo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pueden adquirirse espejos planos y doblarse in situ, menos costes de fabricación</li> <li>■ Posible operación híbrida</li> <li>■ Muy alta eficiencia solar alrededor del mediodía solar.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ El uso de medio de transferencia térmica a base de aceite restringe hoy las temperaturas operativas a 400°C, por lo que se obtienen sólo moderadas calidades de vapor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Los valores anuales de rendimiento previstos, los costes de inversión y su operación necesitan pruebas a mayor escala en operaciones comerciales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ No hay ejemplos de uso comercial a gran escala</li> <li>■ Objetivos de costes previstos de producción en serie aún por probar</li> <li>■ Menor potencial de disponibilidad para integración a la red</li> <li>■ Receptores híbridos aún en proceso de I+D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reciente entrada en el mercado, sólo hay pequeños proyectos operativos</li> </ul>

**Figura 6: Principales características de las centrales solares de concentración.**

Las características de las centrales solares termoelectricas (CET) están llamadas a jugar un papel relevante en la producción de electricidad a gran escala. Un factor importante a evaluar en este tipo de tecnología son sus costes de implantación.

Las tres centrales con mayor desarrollo (colectores parabólicos, disco Stirling y receptor central de torre) presentan diferencias de costes en la primera fase de implantación, aunque posteriormente proyectan costes de producción muy similares.

La evolución del coste generación de electricidad para estas tres tecnologías (Figura 7) se ha equiparado en los últimos años y se estima que sea igual en las tres tecnologías en el año 2020, convirtiendo estas tecnologías en las fuentes energéticas renovables con un futuro más prometedor [4,5].

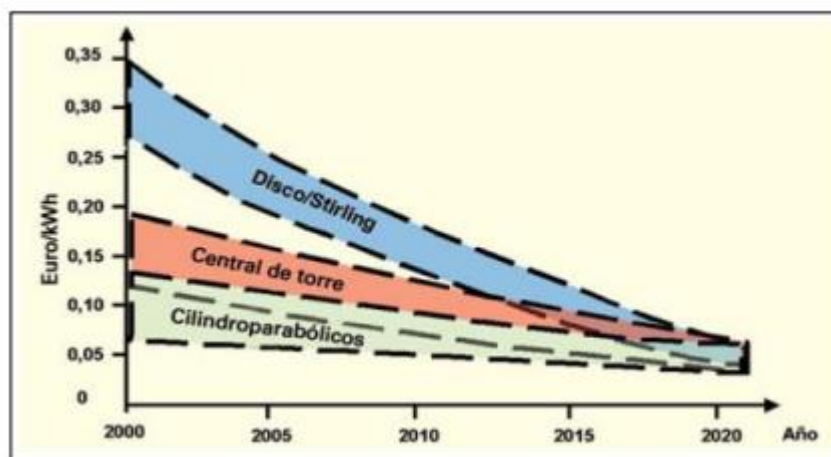


Figura 7: Estimación de costes para las tres principales tecnologías solares [5].

## 1.2. Sistemas de almacenamiento de energía en plantas solares

Desde el punto de vista técnico, las principales características que deben cumplir los sistemas de almacenamiento son las siguientes:

- El material a almacenar debe tener una alta densidad energética.
- Debe existir una buena transferencia de calor entre el fluido que transfiere el calor y el que lo almacena.
- El material de almacenamiento debe tener buenas características mecánicas y químicas, ya que debe soportar muchos ciclos de carga y descarga, así como gradientes de temperatura muy severos, en pequeños intervalos de tiempo.

Para ello es importante definir los tres tipos principales de almacenamiento de energía térmica que se pueden encontrar: almacenamiento de calor latente, de calor sensible y de calor químico.

### 1.2.1. Almacenamiento de calor sensible

Consiste en almacenar la energía que el material usado (sales fundidas) libera cuando su temperatura se reduce, al experimentar un cambio en su energía interna. Además de la densidad y del calor específico, existen otras propiedades que influyen en el almacenamiento de calor sensible, como son la temperatura de operación, la conductividad térmica, difusión, presión de vapor y por último es muy importante tener en cuenta los costes [6].

Los materiales usados para almacenar energía sensible se mantienen sin cambio de fase en el rango de temperaturas del proceso de almacenamiento y el calor almacenado puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \rho * C_p * V * \Delta T \quad [Ec\ 1]$$

Siendo  $\rho$ , la densidad del material de almacenamiento,  $C_p$  el calor específico,  $V$  el volumen de material de almacenamiento utilizado y  $\Delta T$ , el rango de temperatura.

Una gran variedad de fluidos han sido probados como materiales de almacenamiento: agua, aceites, sales fundidas y sodio; destacando entre ellos, las sales fundidas. Su elección atiende a que son líquidos a presión atmosférica, presentan una excelente relación entre la capacidad de almacenamiento y el precio, sus temperaturas de operación son compatibles con las altas presiones y temperaturas en las turbinas de vapor, y no son inflamables ni tóxicos (a diferencia de los aceites sintéticos).

Todos los tipos de centrales anteriormente estudiados utilizan este tipo de almacenamiento de energía.

### 1.2.2. Almacenamiento de calor latente

La energía almacenada procede de un cambio de fase, generalmente sólido-líquido, que ocurre en los materiales de almacenamiento. Este método permite almacenar gran cantidad de energía en poco volumen, reduciendo considerablemente los costes.

Los sistemas de almacenamiento, de materiales con cambio de fase, PCM (Phase change materials) [7], tienen la ventaja de operar con una pequeña diferencia de temperatura entre los ciclos de carga y descarga, de este modo tienen una alta densidad de almacenamiento de energía comparado con el almacenamiento de calor sensible.

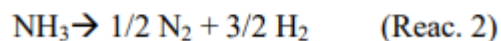
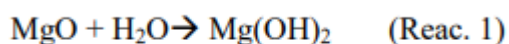
El diseño de centrales solares usando este sistema de almacenamiento está creciendo considerablemente debido a su alta eficiencia energética [8]. El problema de este método es que la mayoría de materiales PCM presentan una baja conductividad térmica y unas velocidades lentas de carga y descarga, con los consecuentes problemas que ello supone.

### 1.2.3. Almacenamiento de calor químico

Para que este tipo de almacenamiento tenga lugar, es necesario que la reacción química involucrada en el proceso sea completamente reversible (con cinética rápida), ya que el calor recibido en el campo solar es usado para provocar una reacción endotérmica, almacenándose los productos de dicha reacción, los cuales al recombinarse liberan energía térmica (reacción exotérmica).

La ventaja de este almacenamiento respecto al resto viene dada por una alta densidad de energía, almacenamiento a temperatura ambiente durante largos periodos sin pérdida térmica y la posibilidad de transportar a largas distancias los productos. Estas características hacen de estos sistemas excelentes candidatos para el almacenamiento de energía procedente de las centrales termoeléctricas.

Dos ejemplos de reacciones químicas que cumplen estos requisitos son los siguientes:

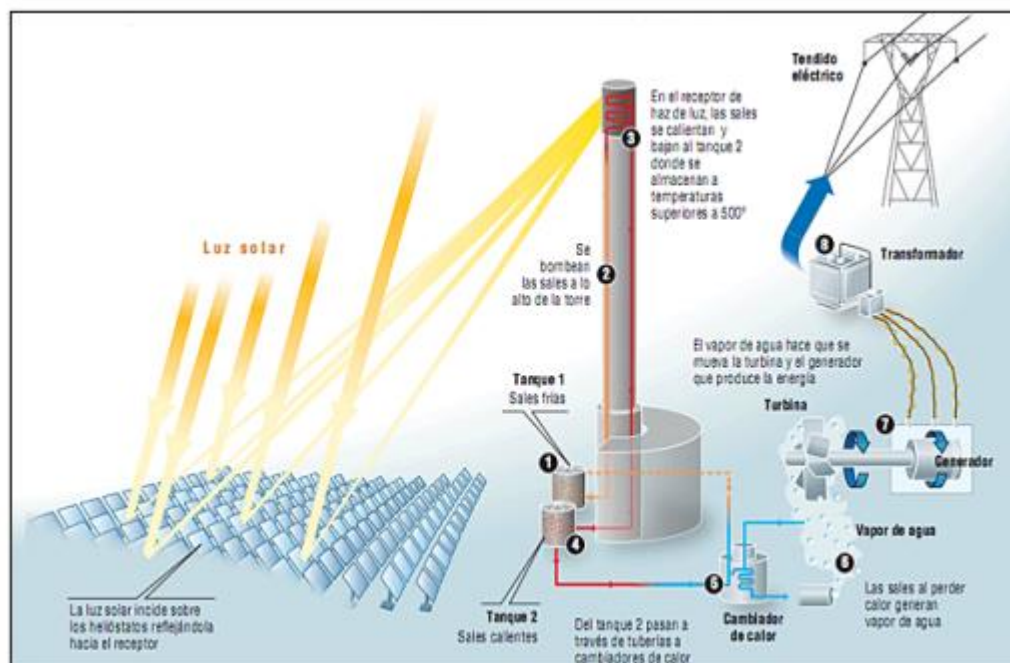


Este sistema permite un gran almacenaje térmico y una duración indefinida, pero lamentablemente el diseño de una reacción termoquímica reversible está todavía en desarrollo experimental [9].

En este proyecto, nos centraremos en el estudio del almacenamiento de calor sensible, que es el más utilizado en las centrales termosolares de hoy en día, en concreto su fluido de trabajo, las sales fundidas. Lo que se busca principalmente a la hora de trabajar con un fluido (en este caso sal fundida), es que pueda trabajar en los rangos de temperatura necesarios, tenga un bajo coste (disponibilidad) y una gran capacidad calorífica. Dentro de este conjunto de características, el rango de temperaturas de trabajo del fluido, mientras mas amplio mejor, ya que si la temperatura de congelación es mas baja, evita problemas de heladas y si es más alto evitará que el fluido se degrade, además de las mejoras en la eficiencia del proceso y del bloque de potencia. Debido a este interés de mejorar la eficiencia de las centrales, se hace este estudio donde analizaremos las ventajas e inconvenientes de las sales basadas en cloruros debido a su gran incremento de las temperaturas de trabajo con respecto a las sales usadas comúnmente, veremos una comparativa entre otras sales con las que se están trabajando actualmente y por último un estado del arte donde se verá toda la información y estudios que se tiene actualmente sobre los diferentes tipos de sales en base cloruro.

## 2 VENTAJAS E INCOVENIENTES

En la última década, hemos visto un aumento mundial en la capacidad de generación de energía solar térmica con la combinación de almacenamiento de energía solar térmica. El número de plantas de energía solar térmica construidas en el sur de Europa, Estados Unidos, África y Australia está aumentando, lo que genera electricidad al reemplazar las instalaciones convencionales de combustión de combustible en las plantas de energía con dispositivos de captación solar térmica. Los receptores solares recolectan energía térmica y elevan la temperatura del fluido de transferencia de calor (HTF), que se alimenta a un intercambiador de calor y hierve a altas temperaturas y altas presiones. El vapor impulsa las turbinas de vapor, que generan electricidad (Figura 8).



**Figura 8: Esquema de funcionamiento de una central solar con receptor central [10].**

Los tres HTF primarios que se usan comúnmente en CSP son:

- Aceites térmicos
- Sales fundidas
- Vapor de agua

Estos HTF tienen limitaciones que afectan en cierta medida al rendimiento de la planta CSP. Se presenta una tabla, donde se hace una comparación de las propiedades térmicas de cada uno de los fluidos que son más utilizados en los sistemas de CSP en la actualidad. Seguidamente se explicaran las limitaciones de estos fluidos.

	Unidad	Sodio (atm)	NaK78 (atm)	Potasio	Hitec XL	Hitec	Hitec sal solar	Dowtherm A
Punto de fusión	°C	97,82	-12,6	63,2	120	142	240	15
Punto de ebullición o máxima temperatura de trabajo	°C	881,4	785	756,5	500	538	567	400
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	820	749	715	1640	1762	1794	1056
Capacidad calorífica	kJ/kgK	1256	0,937	0,782	1,9	1,56	1,214	2,5
Viscosidad	Pa*s	0,00015	0,00018	0,00017	0,0063	0,003	0,0022	0,0002
Conductividad térmica	$\frac{W}{m * K}$	119,3	26,2	30,7	N/A	0,363	0,536	0,093
Número de Prandtl		0,0016	0,0063	0,0043		12,89	4,98	5,38

Tabla 1: Propiedades térmicas de los fluidos caloportadores.

## 2.1 Aceites térmicos

Algunas plantas solares tipo colector de cilindro parabólico utilizan aceite sintético como fluido primario de transferencia de calor.

Existen varias marcas de fluidos sintéticos de transferencia de calor de aceite. El aceite sintético de transferencia de calor, como el Dowtherm A, es estable a temperaturas más altas que el aceite mineral. Comienzan a descomponerse a 400 ° C. A la temperatura máxima de funcionamiento, la presión de vapor de Dowtherm A es de 11 bares, lo que significa que todas las tuberías, juntas y tubos receptores deben estar presurizados. El aceite térmico es altamente inflamable, especialmente a altas temperaturas. También es peligroso para el medio ambiente si se fuga del sistema.

## 2.2 Sales fundidas

El almacenamiento de calor sensible en la sal de nitrato fundido es uno de los medios de almacenamiento térmico más prominentes en la actualidad. El alto punto de fusión de las sales de nitrato eutéctico hacen que sea necesario instalar un sistema de calentamiento en la tubería para evitar que la sal se congele. El calentamiento por traza es donde el HTF se calienta para evitar la congelación. Por esta razón, es preferible utilizar la sal como un HTF primario en un sistema de receptor central donde las tuberías están dentro de la torre y el bloque de alimentación.

Se encuentran disponibles diferentes mezclas de sales fundidas, pero generalmente tienen características de transferencia de calor similares. La sal de alta temperatura más prominente se conoce como sal solar. Es una mezcla eutéctica de nitrato de sodio (60% en peso) y nitrato de potasio (40% en peso). Tiene un punto de fusión de 238 ° C y un rango de temperatura operativa de entre 260 y 567 ° C. No es tóxico, no es inflamable y tiene una baja presión de vapor.

Para aplicaciones de baja temperatura se utilizan productos eutécticos ternarios como Hitec y Hitec XL. Estas mezclas de sal tienen puntos de fusión de aproximadamente 100 ° C más bajos que los de la sal solar, pero su temperatura operativa máxima está entre 500 y 538 ° C. Estas sales son más aplicables para aplicaciones de colectores de cilindro parabólico. La **Tabla 1** muestra las temperaturas operativas de algunas sales fundidas. La sal solar es más adecuada para aplicaciones de alta temperatura.

Existe un incentivo para usar sal fundida como un HTF primario en plantas CCP [11]: las plantas parabólicas son la tecnología de CSP más madura; El aumento de la temperatura máxima de funcionamiento (de 400 ° C a 450-500 ° C) significa una mayor eficiencia térmica.

El uso de sal fundida como HTF en un sistema CCP necesita diseños innovadores para evitar la solidificación de la sal en los tubos receptores. La alta temperatura de fusión de la sal fundida plantea un problema potencial de fiabilidad en las instalaciones de CSP, pero el riesgo se mitiga sustancialmente en las plantas receptoras centrales. El consumo de energía de un sistema de calefacción depende de la planta específica y las cifras pueden variar ampliamente. En un estudio realizado en un sistema CCP de 55 MWe que utiliza sal fundida como un HTF primario, la pérdida de energía térmica nocturna del campo solar fue de 10.7 MWth [11].

En las plantas receptoras centrales con almacenamiento, es posible realizar un almacenamiento térmico y operar a una temperatura máxima de 567 ° C. El riesgo de bloqueo por la sal congelada todavía está presente, pero debido a que las tuberías de transferencia de calor están centralizadas y son sustancialmente más cortas, la protección contra la congelación es más manejable.

## 2.3 Vapor de agua

El vapor permite temperaturas operativas más altas que las posibles con sal fundida o aceite térmico.

Teóricamente es posible alcanzar temperaturas sobrecalentadas, pero las altas presiones de funcionamiento son un factor limitante. Si bien es posible construir un ciclo de vapor, regular que funcione a presiones supercríticas, es un desafío técnico crear un equipo receptor que pueda manejar altas presiones.

Actualmente, las condiciones máximas de vapor operacional para un CCP son 500°C a 120 bar. Esta tecnología aún está en desarrollo, pero los principales desafíos son [12]:

- Disponibilidad en un gran número de componentes de alta presión, como mangueras de conector flexible y tubos receptores de alta presión.
- Almacenamiento adecuado de energía térmica.
- Gestión de procesos de generación directa de vapor dentro de un gran campo paralelo.

En los sistemas de receptor central, las limitaciones de presión son mucho menores y el control del proceso es mucho más simple, pero el almacenamiento térmico sigue siendo un problema.

Otro factor limitante es la compensación entre el rendimiento del tubo receptor y la presión máxima de operación. Las presiones más altas significan que los tubos receptores deben estar hechos de tubos de paredes más gruesas. Las paredes más gruesas impiden el rendimiento de transferencia de calor de los tubos receptores.

## 2.4 Aire o gas

En un intento por lograr mayores eficiencias térmicas, se ha propuesto que se utilice aire comprimido o gas en un ciclo de Brayton. Dado que tanto el HTF como el fluido de trabajo es un gas, la temperatura máxima ya no está limitada por el HTF o el fluido de trabajo. Pero hay una serie de inconvenientes:

- La baja densidad del gas / aire requiere grandes áreas de transferencia de calor para que se produzca un intercambio de calor eficiente
- Dado que el gas o el aire están a alta presión, se necesita un receptor volumétrico cerrado. Este es un gran desafío técnico por dos razones; el área de superficie necesaria para un intercambio de calor efectivo es grande, y la abertura debe estar cubierta por una lente completamente transparente que pueda soportar altas temperaturas y presiones [13].

-El almacenamiento térmico es difícil y necesita una gran superficie para el intercambio de calor.

## 2.5 Sodio

El sodio es un conocido HTF en reactores de neutrones rápidos. Tiene un punto de fusión de  $97.8^{\circ}\text{C}$  y un punto de ebullición de  $881.4^{\circ}\text{C}$ . Tiene una conductividad térmica muy alta y una capacidad calorífica relativamente alta, lo que lo convierte en un buen HTF, pero es muy reactivo con el agua. En los años 50, los Estados Unidos de América comenzaron el desarrollo de reactores reproductores rápidos de metal líquido (LMFBR). El sodio se eligió como refrigerante debido a su buena transferencia de calor y sus características nucleares. Los resultados del programa fueron muy estrictos y tuvieron que cumplir con las pautas y estándares que garantizaban el funcionamiento confiable de las centrales eléctricas enfriadas con sodio y la capacidad de los operadores para vivir con sodio de forma rutinaria. Todos los datos, las pautas y la experiencia adquirida en este programa se publicaron en el Manual de Ingeniería de Sodio-NaK por el Centro de Ingeniería de Metales Líquidos [14].

En los años 80, un consorcio financiado por la IEA investigó el uso de sodio como refrigerante en las aplicaciones de CSP.

La prueba se realizó en la Plataforma Solar de Almería (PSA) como el Experimento de Alto Flujo [15]. En agosto de 1985, se produjo un incendio de sodio durante un procedimiento de mantenimiento que causó grandes daños al sistema de sodio y al PSA. Este evento enfatizó la importancia de las prácticas seguras de diseño de metales líquidos.

El sodio se solidifica a  $97.8^{\circ}\text{C}$ . En un sistema donde la fuente primaria de energía térmica es intermitente, existe la posibilidad de que el sodio pueda solidificarse en algún lugar del sistema. Esto causa un peligro y se deberán tomar algunas medidas para desbloquear el sistema y evitar un derrame de sodio. Esta situación se evita a toda costa en la industria nuclear, y en su lugar se utiliza la aleación Eutectic NaK [14].

## 2.6 NaK

En los LMFBR que deben operarse de manera intermitente, la solidificación del sodio causa un problema de fiabilidad inherente. Por lo tanto, NaK se utiliza en estos reactores [14]. De manera similar, se puede argumentar que el uso de sodio en una aplicación de CSP causa un riesgo inherente de bloqueo ya que la fuente de energía es intermitente, por lo tanto, NaK es más adecuado para aplicaciones de CSP.

NaK es una aleación eutéctica de sodio y potasio que se funde a  $-12.8^{\circ}\text{C}$  a la atmósfera y hierve a  $785^{\circ}\text{C}$  a la atmósfera. Si se utiliza NaK como HTF primario, es posible una temperatura máxima de operación de  $785^{\circ}\text{C}$ , y el HTF permanecerá líquido independientemente de las condiciones de operación. NaK tiene propiedades de transferencia de calor inferiores a las del sodio (consulte la **Tabla 1**) y tiene una capacidad de calor específica relativamente baja en comparación con otros HTF, pero aún se considera un excelente medio de transferencia de calor. El sistema eutéctico NaK también permite diferentes composiciones de sodio y potasio. Eutectico NaK tiene una composición de 77.8% de potasio en peso y 22.2% de sodio. Es posible usar NaK46 (46% de potasio), que tiene un punto de fusión de  $20^{\circ}\text{C}$ , y tiene una conductividad térmica más alta y una mayor capacidad de calor específico que la NaK eutéctica [14]. Las propiedades del sodio, potasio y NaK se muestran en la **Tabla 1**. Las propiedades de NaK (en la **Tabla 1**) son las de la aleación de NaK eutéctica, aunque se reconoce que la aleación de NaK con mayor contenido de sodio es más adecuada para las aplicaciones de CSP.

El mayor riesgo que implica el NaK y el sodio es que reacciona violentamente con el agua. Esto se convierte en un problema durante el mantenimiento rutinario y cuando es necesario reemplazar las piezas. En un sistema que utiliza NaK, es posible limpiar la tubería utilizando gas inerte a alta presión cuando el sistema se ha enfriado. Esto es intrínsecamente más seguro que una situación en la que existe un riesgo de bloqueo de la tubería durante el mantenimiento.

Al presurizar el NaK eutéctico a una presión de 10 bar, la temperatura operativa del NaK líquido se puede aumentar a más de  $1100^{\circ}\text{C}$  [14].



## 2.7 Conclusiones

Aumentar la temperatura en una planta de CSP de 390°C a 500°C (usando sales fundidas) aumentaría la eficiencia del ciclo de Rankine a un rango del 40% (comparado con la eficiencia del 37.6% usando Therminol VP-1) y por lo tanto reduciría el LCOE a 2 centavos (\$) / kWh. Para un mayor desarrollo de las tecnologías de CSP, es importante encontrar un fluido de transferencia de calor que trabaje a altas temperaturas.

Existen múltiples objetivos o puntos que debe cumplir fluido para saber si sirve como fluido de transferencia de calor en un cierto rango de variación de temperaturas:

- En primer lugar un fluido debe tener una baja temperatura de congelación para evitar la solidificación en el sistema de circulación.

- Segundo, el fluido debe ser químicamente estable a altas temperaturas y al mismo tiempo trabajar a bajas presiones de vapor (por debajo de 1.0 atm) debido a los requisitos de seguridad de los contenedores y tuberías.

- Tercero, el fluido debe generar una corrosión mínima en las tuberías metálicas y los recipientes que contienen los fluidos.

- Además el fluido de transferencia de calor debe tener propiedades de transporte favorables (baja viscosidad y alta conductividad térmica) para un intercambio de calor eficiente y una baja pérdida de presión en el flujo y la circulación.

Las sales fundidas se han estudiado por su alta temperatura de trabajo y al mismo tiempo por sus bajos puntos de fusión, densidad moderada, alta capacidad calorífica y alta conductividad térmica. Además de las propiedades térmicas y de transporte favorables, la estabilidad térmica a largo plazo (o la estabilidad química con menos corrosión en los contenedores) y el bajo costo de la sal fundida HTF también son críticos.

Debido a la gran demanda, el trabajo de investigación de sales fundidas adecuadas para HTF, así como materiales de almacenamiento de energía térmica en plantas de energía solar térmica es muy reciente.

La tecnología actual en CSP utiliza nitratos fundidos como un fluido de transferencia de calor (HTF) y como medio de almacenamiento de energía térmica (TES). Una de las plantas a escala industrial más reciente, Gemasolar, que tiene 15 horas de TES, lo que le permite producir energía durante las horas nocturnas. En las configuraciones actuales de la planta, las sales de nitrato funcionan bien y existen varias décadas de experiencia tanto en los Laboratorios Nacionales Sandia como en otros lugares. Sin embargo, para aumentar la eficiencia de la planta, se deben aumentar las temperaturas de los receptores y los sistemas TES.

Es bien sabido que las sales de nitrato se acercan a su límite de estabilidad alrededor de 600°C.

Si bien esta estabilidad depende de muchos factores (es decir, presión, temperatura, presencia de varios cationes, tiempo a temperatura, superficie libre disponible para la reacción, concentraciones de impurezas, etc.), las sales de nitrato probablemente no podrán seguir trabajando para las altas temperaturas requeridas para la viabilidad económica de la energía solar térmica. Se está estudiando que las temperaturas de 700-800°C utilicen completamente los ciclos de Brayton de dióxido de carbono supercrítico avanzado ( $S - CO_2$ ).

Existen muchas alternativas diferentes para los HTF en este rango de temperaturas. Una de las principales preocupaciones de los HTF que trabajan a alta temperatura es la compatibilidad de los materiales. En la mayoría de las situaciones, a medida que aumenta la temperatura, el comportamiento corrosivo del fluido aumenta.

Las composiciones eutécticas binarias y ternarias basadas en fluoruros y cloruros son los materiales más prospectivos en términos de sus propiedades térmicas y de transporte posiblemente favorables, así como en particular de su coste razonablemente bajo. Los eutécticos de las sales de fluoruro se han utilizado en la energía solar espacial y en los reactores nucleares de sal fundida debido a sus propiedades térmicas y de transporte favorables, especialmente la capacidad de almacenamiento de calor, pero con la desventaja de un alto coste, compatibilidad de materiales y toxicidad. Los carbonatos también se pueden usar para HTF a alta temperatura y materiales de almacenamiento de calor latente, pero con una alta viscosidad y fácil degradación. En consecuencia, las sales de cloruros son mas atractivas debido a sus propiedades posiblemente favorables y

especialmente a un bajo coste. Financiado por los EE.UU. El Departamento de Energía, un equipo de investigadores de la Universidad de Arizona, el Instituto de Tecnología de Georgia y la Universidad Estatal de Arizona han realizado estudios sobre sales eutécticas de orden ternario, cuaternario e incluso superior, basadas en cinco especies clave de sales de haluro:  $AlCl_3$ ,  $ZnCl_2$ ,  $FeCl_3$ ,  $NaCl$  y  $KCl$ . Estas especies son relativamente baratas y muy abundantes (gran disponibilidad). Se espera que la mezcla de estas sales iónicas y covalentes cree las propiedades favorables requeridas para el HTF.

### 3 COMPARATIVA SALES DE CLORUROS Y CARBONATOS

Recientemente, se presta mayor atención a las aplicaciones de sales de cloruro fundido en plantas de energía solar concentrada (CSP) como materiales de almacenamiento de energía térmica (TES) y fluido de transferencia de calor (HTF) debido a sus altos límites de estabilidad térmica ( $> 800^{\circ}\text{C}$ ) y bajos precios, en comparación con las mezclas de sales de nitrato comerciales (descompuestas a unos  $550\text{-}600^{\circ}\text{C}$ ) [16].

La **Tabla 2**, compara las propiedades termofísicas y los precios a gran escala de las sales fundidas consideradas comúnmente como materiales TES y HTF en CSP. De la comparación, se puede concluir que:

- Todas las sales fundidas tienen una densidad similar de  $\sim 2000 \text{ kg/m}^3$ .
- Las sales comerciales de nitrato / nitrito tienen bajos puntos de fusión, altas capacidades de calor y bajos precios, pero bajos límites de estabilidad térmica (descompuestos a  $\sim 550^{\circ}\text{C}$ ).
- Las sales de carbonato tienen puntos de fusión moderados ( $> 390^{\circ}\text{C}$ ), altos límites de estabilidad térmica ( $> 650^{\circ}\text{C}$ ) y altas capacidades de calor, pero precios altos debido a la utilización del costoso  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  para bajos puntos de fusión.
- Las sales de fluoruro tienen altos límites de estabilidad térmica (estable  $> 700^{\circ}\text{C}$ ) y altas capacidades de calor, pero son tóxicas y relativamente caras y tienen altos puntos de fusión ( $> 450^{\circ}\text{C}$ ).
- Las sales de cloruro tienen puntos de fusión moderados ( $< 400^{\circ}\text{C}$ ), altos límites de estabilidad térmica ( $> 800^{\circ}\text{C}$ ), capacidades de calor moderadas y precios bajos.

Molten salts composition (wt. %)	Melting point ( $^{\circ}\text{C}$ )	Stability limit ( $^{\circ}\text{C}$ )	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	Heat capacity ( $\text{kJ/kgK}$ )	Material cost ( $\text{US \$ /kg}$ )
Solar salt $\text{KNO}_3 - \text{NaNO}_3$ (40 – 60)	240	530-565	$\sim 1800$ ( $400^{\circ}\text{C}$ )	$\sim 1,5$ ( $400^{\circ}\text{C}$ )	0,5-0,8
HiteC $\text{KNO}_3 - \text{NaNO}_3 - \text{NaNO}_2$ (53 – 7 – 40)	142	450-540	$\sim 1800$ ( $400^{\circ}\text{C}$ )	1,5 ( $400^{\circ}\text{C}$ )	0,9
LiNaK carbonates $\text{K}_2\text{CO}_3 - \text{Li}_2\text{CO}_3 - \text{Na}_2\text{CO}_3$ (32 – 35 – 33)	397	$> 650$	2000 ( $700^{\circ}\text{C}$ )	1,9 ( $700^{\circ}\text{C}$ )	1,3-2,5
LiNaK fluorides $\text{KF} - \text{LiF} - \text{NaF}$ (59 – 29 – 12)	454	$> 700$	2000 ( $700^{\circ}\text{C}$ )	1,9 ( $700^{\circ}\text{C}$ )	$> 2$
ZnNaK chlorides $\text{KCl} - \text{NaCl} - \text{ZnCl}_2$ (23,9 – 7,5 – 68,5)	204	850	$\sim 2000$ ( $600^{\circ}\text{C}$ )	0,8 ( $300\text{-}600^{\circ}\text{C}$ )	$< 1$
MgNaK chlorides $\text{KCl} - \text{MgCl}_2 - \text{NaCl}$ (17,8 – 68,2 – 14,0)	380	$> 800$	$\sim 1700$ ( $600^{\circ}\text{C}$ )	$\sim 1,0$ ( $500\text{-}800^{\circ}\text{C}$ )	$< 0,35$

**Tabla 2: Comparación de las propiedades termofísicas y los precios a gran escala de las sales fundidas consideradas comúnmente como materiales TES y HTF en CSP [16].**

Por lo tanto, debido a las propiedades termofísicas satisfactorias y los bajos precios de los cloruros, el Departamento de Energía de los EE. UU. (DOE, por sus siglas en inglés) ha apoyado el desarrollo de sal de cloruro fundido para las plantas de CSP de próxima generación en el transcurso de la Iniciativa SunShot [17].

En la próxima generación de CSP, se espera una mayor eficiencia de conversión de energía al aumentar la temperatura de operación TES / HTF ( $T > 720^{\circ}\text{C}$ ) y al utilizar el ciclo Brayton  $s\text{CO}_2$  [17].

Sin embargo, la mayor temperatura de operación de los materiales TES / HTF (en este trabajo, es decir, cloruros fundidos) causa desafíos adicionales, particularmente una mayor corrosividad de las aleaciones metálicas utilizadas como recipientes y materiales estructurales. Esto limita significativamente la vida útil de los materiales estructurales y aumenta el costo nivelado de la electricidad (LCOE). Fe, Cr y Ni son los elementos comunes para las aleaciones comerciales como materiales estructurales. Dado que la energía libre de formación de  $\text{CrCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_2$  y  $\text{NiCl}_2$  es mayor que la de las sales de cloruro (por ejemplo,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{KCl}$  y  $\text{NaCl}$ ) en las mezclas de cloruro, que se utilizan como materiales TES / HTF, la corrosión de las aleaciones no puede ser causada por estas sales de cloruro en las mezclas de cloruro [18]. Otro mecanismo que conduce el proceso de corrosión, p. Ej. mecanismo de corrosión impulsado por impurezas, debe ser considerado [18]. La adición de  $\text{MgCl}_2$  o  $\text{ZnCl}_2$  en mezclas de sales de cloruro conduce a bajos puntos de fusión. Sin embargo,  $\text{MgCl}_2$  y  $\text{ZnCl}_2$  son cloruros fuertemente higroscópicos. Una pequeña cantidad de agua adsorbida en ellos conduce a una severa corrosión de las aleaciones en los cloruros fundidos [16,18]. Además, el agua u  $\text{O}_2$  en la atmósfera por encima de las sales fundidas acelera la corrosión de las aleaciones. Por lo tanto, los estudios sobre el comportamiento de la corrosión y las estrategias de mitigación de las aleaciones en sales de cloruro fundido con impurezas corrosivas a altas temperaturas de operación ( $500$ - $800^{\circ}\text{C}$ ) son esenciales para realizar las aplicaciones de cloruros fundidos en CSP y procesos industriales de alta temperatura [17].

Este trabajo presenta las propiedades y los precios a gran escala de cloruros simples y mezclas de cloruro para seleccionar mezclas de sales de cloruro fundido, que son prometedoras para la próxima generación de CSP.

Para seleccionar las prometedoras mezclas de sal de cloruro fundido para la próxima generación de CSP, se comparan las propiedades y los precios a gran escala de cloruros simples y mezclas de cloruros. La **Tabla 3**, muestra las propiedades termofísicas, las fases de hidratos y los precios a gran escala de cloruros individuales seleccionados, mientras que la **Figura 9** presenta las presiones de vapor de algunos cloruros individuales representativos.

De la **Tabla 3** y la **Figura 9**, se puede concluir que:

- $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{FeCl}_3$  y  $\text{ZnCl}_2$  tienen bajos puntos de fusión en comparación con otras sales de cloruro (consulte la **Tabla 3**). Los bajos puntos de fusión favorecen el mayor rango operativo de temperaturas de TES / HTF, así como para reducir el riesgo de congelación de la sal durante la operación de CSP [17].

- Sin embargo, a temperaturas de funcionamiento del ciclo Brayton de  $s\text{CO}_2$  para altas eficiencias ( $T > 720^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{FeCl}_3$  y  $\text{ZnCl}_2$  trabajan a altas presiones de vapor ( $> 1$  bar), mientras que otros cloruros como  $\text{MgCl}_2$  trabajan a bajas presiones de vapor ( $< 0.01$  bar) (ver **Figura 9**). La baja presión de vapor es una ventaja para la aplicación de cloruros fundidos como TES / HTF, ya que la evaporación y la condensación de la sal en el sistema de almacenamiento son más bajas y no se requiere un tanque de almacenamiento presurizado.

- Los cloruros como  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{SrCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_3$  y  $\text{ZnCl}_2$  son muy higroscópicos. Deben ser purificados, es decir, el agua hidratada debe eliminarse, ya que la reacción de hidrólisis térmica del agua hidratada durante el calentamiento puede producir HCl corrosivo e iones hidroxilo dañinos para los tanques de almacenamiento metálicos y materiales estructurales durante la operación.

- $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{LiCl}$  y  $\text{NaCl}$  tienen altas capacidades de calor ( $> 0,9 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) en comparación con otros cloruros (consulte la **Tabla 3**).

Las sales de cloruro de metal alcalino como KCl y NaCl tienen altas capacidades de calor, trabajan a bajas presiones de vapor a altas temperaturas, higroscopía débil y precios bajos, pero altas temperaturas de fusión ( $> 750^{\circ}\text{C}$ ). Como se muestra en la **Tabla 4**, las temperaturas de fusión de las sales de cloruro de metal alcalino individuales se pueden reducir significativamente al mezclarlas con cloruros de metales alcalinotérreos (por ejemplo,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{SrCl}_2$ ) u otros cloruros metálicos como  $\text{ZnCl}_2$  y  $\text{AlCl}_3$ , para tener una temperatura de operación de más alta entre las mezclas de cloruro binario de la **Tabla 4**, la mezcla de  $\text{MgCl}_2$  /  $\text{KCl}$  tiene una temperatura de fusión relativamente baja ( $426^{\circ}\text{C}$ ), presiones de vapor bajas a alta temperaturas (**Figura 9**) y precio bajo ( $\sim 0.35 \text{ US \$ / kg}$  [17]). Se puede mejorar aún más mediante la adición de NaCl económico (**Tabla 3**) para tener una temperatura de fusión más baja, un costo reducido y una mayor capacidad de calor (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La mezcla tutaria eutéctica  $\text{MgCl}_2$  /  $\text{KCl}$  /  $\text{NaCl}$

tiene una temperatura de fusión de  $<380^{\circ}\text{C}$  (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por lo tanto, las mezclas de  $\text{MgCl}_2 / \text{KCl} / \text{NaCl}$  son mezclas de cloruro prometedoras como materiales de alta temperatura TES / HTF en la próxima generación de CSP. Se está desarrollando dichas mezclas de cloruros hacia la aplicación de CSP mediante el estudio del comportamiento de corrosión y las estrategias de mitigación de las aleaciones.

Chloride salts	$T_m$ [8] ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_b$ [8] ( $^{\circ}\text{C}$ )	Hydrates phases	Heat capacity (liquid) ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	Material Cost (US \$/kg)
$\text{AlCl}_3$	193	180*	6	0.94	$\sim 0.9^{\ddagger}$
$\text{BaCl}_2$	961	1560	2	0.52	$\sim 0.5^{\ddagger}$
$\text{CaCl}_2$	775	1935	1, 2, 4, 6	0.92	$\sim 0.3^{\ddagger}$
$\text{CrCl}_2$	824	1120	N/A	N/A	N/A
$(\text{CrCl}_3)$	(1152)	(1300 dec)	(6)	N/A	N/A
$(\text{CrCl}_4)$	(gas)	(>600 dec)	(N/A)	N/A	N/A
$\text{FeCl}_3$	308	316	6	0.83	$\sim 0.5^{\ddagger}$
$(\text{FeCl}_2)$	(677)	(1023)	(2, 4)	(0.81)	
$\text{KCl}$	771	N/A	no	0.99	0.43
$\text{LiCl}$	610	1383	1	1.5	$>3^{\ddagger}$
$\text{MgCl}_2$	714	1412	1, 2, 4, 6	0.97	0.2
$\text{NaCl}$	801	1465	no	1.1	0.06
$\text{SrCl}_2$	874	1250	6	0.66	N/A
$\text{ZnCl}_2$	290	732	1, 1.5, 2.5, 3, 4	0.74	1

Tabla 3: Comparación de propiedades termofísicas y los precios a gran escala de cloruros simples y mezclas de cloruros [17,19-22].

	$\text{AlCl}_3$ 193 $^{\circ}\text{C}$	$\text{BaCl}_2$ 961 $^{\circ}\text{C}$	$\text{CaCl}_2$ 775 $^{\circ}\text{C}$	$\text{KCl}$ 771 $^{\circ}\text{C}$	$\text{FeCl}_3$ 308 $^{\circ}\text{C}$	$\text{LiCl}$ 610 $^{\circ}\text{C}$	$\text{MgCl}_2$ 714 $^{\circ}\text{C}$	$\text{NaCl}$ 801 $^{\circ}\text{C}$	$\text{SrCl}_2$ 874 $^{\circ}\text{C}$
$\text{BaCl}_2$ 961 $^{\circ}\text{C}$	192 $^{\circ}\text{C}$								
$\text{CaCl}_2$ 775 $^{\circ}\text{C}$	N/A	608 $^{\circ}\text{C}$							
$\text{FeCl}_3$ 308 $^{\circ}\text{C}$	N/A	N/A	N/A	235 $^{\circ}\text{C}$					
$\text{KCl}$ 771 $^{\circ}\text{C}$	128 $^{\circ}\text{C}$	649 $^{\circ}\text{C}$	600 $^{\circ}\text{C}$						
$\text{LiCl}$ 610 $^{\circ}\text{C}$	145 $^{\circ}\text{C}$	514 $^{\circ}\text{C}$	475 $^{\circ}\text{C}$	355 $^{\circ}\text{C}$	N/A				
$\text{MgCl}_2$ 714 $^{\circ}\text{C}$	N/A	559 $^{\circ}\text{C}$	617 $^{\circ}\text{C}$	426 $^{\circ}\text{C}$	N/A	571 $^{\circ}\text{C}$			
$\text{NaCl}$ 801 $^{\circ}\text{C}$	105 $^{\circ}\text{C}$	651 $^{\circ}\text{C}$	504 $^{\circ}\text{C}$	657 $^{\circ}\text{C}$	162 $^{\circ}\text{C}$	554 $^{\circ}\text{C}$	445 $^{\circ}\text{C}$		
$\text{SrCl}_2$ 874 $^{\circ}\text{C}$	N/A	849 $^{\circ}\text{C}$	662 $^{\circ}\text{C}$	584 $^{\circ}\text{C}$	N/A	492 $^{\circ}\text{C}$	535 $^{\circ}\text{C}$	565 $^{\circ}\text{C}$	
$\text{ZnCl}_2$ 290 $^{\circ}\text{C}$	N/A	N/A	N/A	230 $^{\circ}\text{C}$	N/A	N/A	N/A	262 $^{\circ}\text{C}$	N/A

Tabla 4: Temperaturas de fusión de mezclas de cloruro binario eutéctico [23-26].

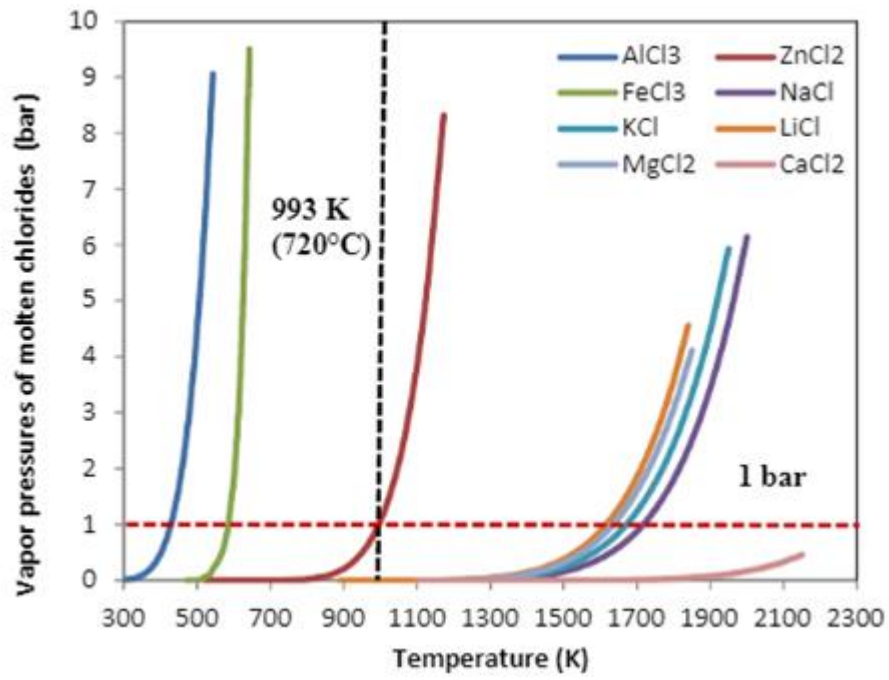


Figura 9: Presión de vapor de sales de cloruro único [21,27 ].

## 4 ESTADO DEL ARTE

### 4.1 Introducción

En este apartado se recoge toda la información y estudios que se tienen por el momento de la gran mayoría de sales en base cloruro, los que parecen que están dando mejores resultados y tienen posibilidad de ser implementados en centrales en un futuro.

Como se ha comentado con anterioridad, en un fluido caloportador buscamos principalmente que este sea abundante y no costoso (disponibilidad), que trabaje con amplios rangos de temperatura (mientras más grande mejor), de manera que el punto de congelación sea lo más bajo posible para evitar problemas de solidificación y el punto de degradación del fluido sea el más alto posible, de manera que mientras a mayor temperatura pueda trabajar nuestro fluido mejor ya que mejora la eficiencia de nuestra central.

Primero se hará una introducción, donde se verán cuáles son los fluidos térmicos más usados junto con sus características. Luego veremos los diferentes cloruros que se están estudiando y de ahí iremos a las mezclas binarias y ternarias de cloruros.

Para finalizar este apartado veremos otros estudios interesantes acerca de las sales de cloruros y una tabla resumen de las características de los diferentes cloruros que hemos visto en esta literatura.

### 4.2 Fluidos térmicos

Es comprensible que las sales iónicas y de haluros covalentes tengan diferentes tamaños de molécula, forma y enlace químico. La unión de un ion positivo y un ion negativo puede causar desorden que conduce a una mezcla eutéctica con bajas temperaturas de fusión. En la **Figura 10**, se muestran fuertes evidencias de bajos puntos de fusión en algunas composiciones eutécticas en los diagramas de fase de algunas mezclas binarias y ternarias por sal iónica haluro con sal covalente ( $NaCl - AlCl_3$ ,  $KCl - AlCl_3$ ,  $NaCl - ZnCl_2$ ,  $KCl - ZnCl_2$ ,  $NaCl - KCl - AlCl_3$ ,  $NaCl - KCl - ZnCl_2$ ). Aunque es muy prometedor, se necesita realizar una cantidad significativa de trabajo para comprender completamente todas las propiedades de estas mezclas de sal.

Obviamente, la identificación de las composiciones eutécticas que tienen bajos puntos de fusión es solo el primer paso para desarrollar HTF. Como objetivo final, HTF debe cumplir con el objetivo de las propiedades térmicas y de transporte en un rango de temperatura relativamente amplio, desde por debajo de 250°C hasta al menos por encima de 800°C.

Para obtener las propiedades térmicas y de transporte de las mezclas de alto orden (de componentes ternarios y cuaternarios), las propiedades de todos los componentes individuales, así como todas las mezclas de sal de bajo orden, tienen que ser identificados. Para este propósito, en este trabajo se revisan los datos experimentales actualmente disponibles para la densidad, viscosidad, conductividad térmica, capacidad térmica, presión de vapor y punto de fusión de varias especies de sal de haluro, así como sus mezclas binarias a ternarias.

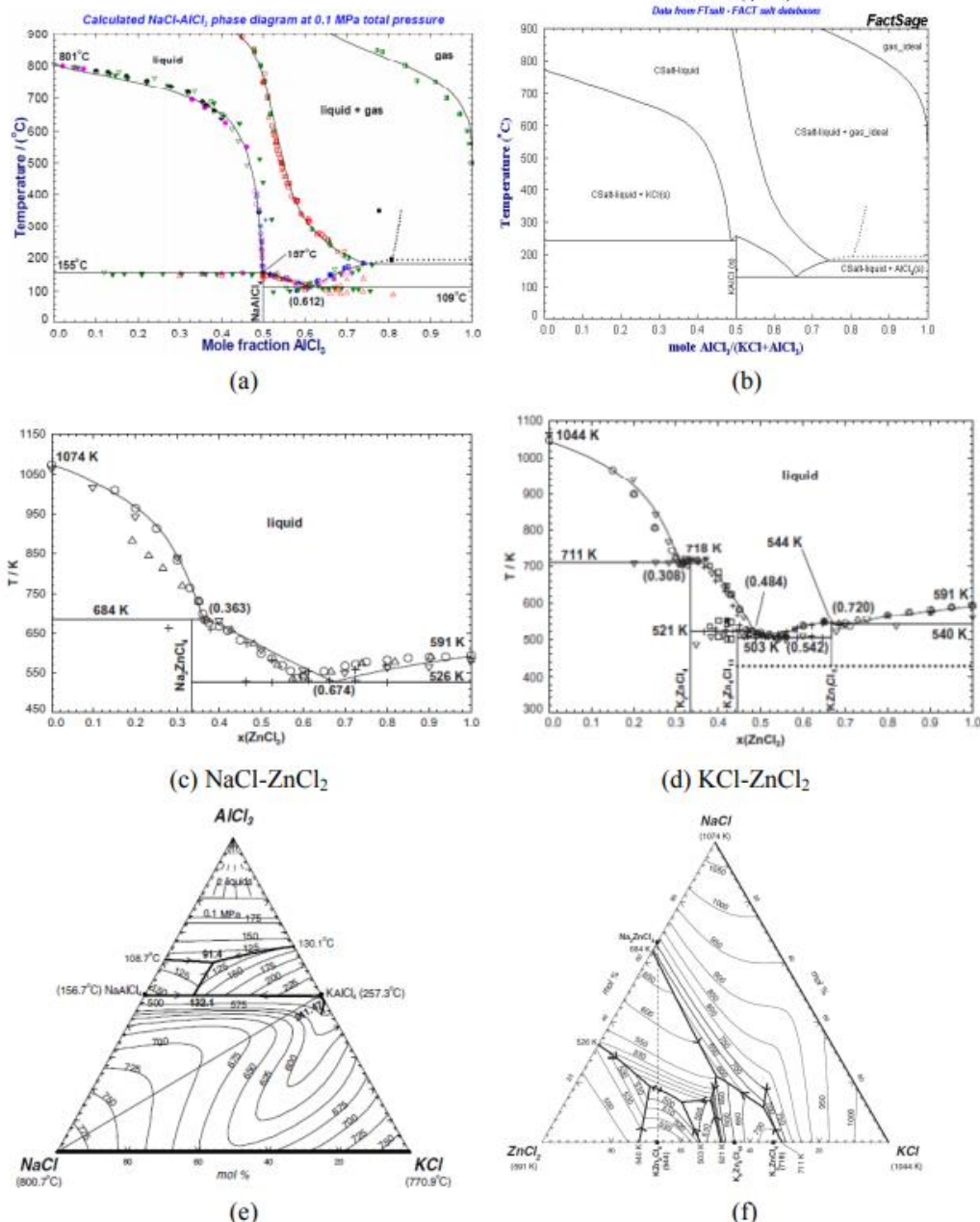


Figura 10: Diagramas de fase de mezclas binarias y ternarias de sales iónicas y haluros covalentes [64,65].

Hasta ahora, varias sales fundidas comerciales bien conocidas por mezclas eutécticas de nitratos o nitritos se han usado en sistemas de energía solar concentrada principalmente para propósitos de almacenamiento térmico, pero también se pueden usar como HTF. La mezcla binaria, sal solar (60% *en peso* de NaNO<sub>3</sub> / 40% *en peso* de KNO<sub>3</sub>) se usó como material de almacenamiento térmico en el proyecto del receptor central solar-II de 10 MWe en California [30-32], en el sistema directo de 2 tanques del proyecto Archimede en Italia [33], y el sistema indirecto de almacenamiento de energía térmica para la planta de Andasol en España [34,35].

La sal solar tiene una estabilidad térmica (por debajo de 600°C) y un punto de fusión relativamente alto (220°C). Se ha considerado que un nuevo fluido de transferencia de calor llamado Hitec, que es una mezcla de sal ternaria de 53% *en peso* de KNO<sub>3</sub> / 7% *en peso* de NaNO<sub>3</sub> / 40% *en peso* de NaNO<sub>2</sub>, reemplaza a la sal solar debido a su bajo punto de congelación de 142°C [36]. Hitec es térmicamente estable a temperaturas de hasta 454°C y puede usarse a temperaturas de hasta 538°C durante un corto período de tiempo [37]. Una versión modificada, Hitec XL, es una mezcla de 48% *en peso* de Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> / 7% *en peso* de NaNO<sub>3</sub> /



45% en peso de  $KNO_3$  que se funde a aproximadamente  $133^\circ\text{C}$  y se puede usar a temperaturas de hasta  $500^\circ\text{C}$  [38-53]. Diferentes composiciones de  $Ca(NO_3)_2$  /  $NaNO_3$  /  $KNO_3$  se han identificado en la literatura abierta como sales eutécticas [39-53]. La sal eutéctica ternaria con una composición de 44% en peso de  $Ca(NO_3)_2$  / 12% en peso de  $NaNO_3$  / 44% en peso de  $KNO_3$  se funde a  $127.6^\circ\text{C}$  y su estabilidad térmica es buena hasta  $622^\circ\text{C}$  publicado para el sistema  $Ca(NO_3)_2$  /  $NaNO_3$  /  $KNO_3$  [54-57].

También se están desarrollando otras sales ternarias y se están realizando pruebas para su aplicación industrial.

Sal en composición de 30% en peso de  $LiNO_3$  / 18% en peso de  $LiNO_3$  / 20,0% en peso de  $NaNO_3$  / 54,1% en peso de  $KNO_3$  se funde a aproximadamente  $118^\circ\text{C}$  y la estabilidad térmica es de hasta  $435^\circ\text{C}$  [58,59]. Se informa que el % de  $NaNO_3$  / 52% en peso de  $KNO_3$  tiene una estabilidad térmica de hasta  $550^\circ\text{C}$  y un punto de fusión de  $120^\circ\text{C}$  [60-62]. Otra mezcla de sal de nitrato ternario que consiste en 50-80% en peso de  $KNO_3$  / 0 – 25% en peso de  $LiNO_3$  / 10 – 45% en peso de  $Ca(NO_3)_2$  se funde por debajo de  $100^\circ\text{C}$  y la estabilidad térmica es de hasta  $500^\circ\text{C}$  [63]. Sandia National Laboratories desarrolló un fluido de transferencia de calor de bajo punto de fusión hecho de una mezcla de cuatro sales de nitrato inorgánico: 9 – 18% en peso de  $NaNO_3$  / 40 – 52% en peso de  $KNO_3$  / 13 – 21% en peso de  $LiNO_3$  / 20 – 27% en peso de  $Ca(NO_3)_2$  [64]. Esta mezcla de sal cuaternaria tiene una temperatura de fusión inferior a  $100^\circ\text{C}$  y el límite de estabilidad térmica es superior a  $500^\circ\text{C}$ . La sal cuaternaria 17,77% en peso de  $LiNO_3$  / 15,28% en peso de  $NaNO_3$  / 35,97% en peso de  $KNO_3$  / 30,98% en peso de  $2KNO_3 \cdot Mg(NO_3)_2$  se funde a aproximadamente  $100.9^\circ\text{C}$ , pero no hay datos sobre la estabilidad térmica [65]. Otra mezcla de sal de nitrato cuaternario que consiste en 17.5% en peso de  $LiNO_3$  / 14.2% en peso de  $NaNO_3$  / 50.5% en peso de  $KNO_3$  / 17.8% en peso de  $NaNO_2$  tiene un punto de fusión de  $99^\circ\text{C}$  y una estabilidad térmica de hasta  $500^\circ\text{C}$  [66]. También se han desarrollado especies de sales, por ejemplo, la sal con composiciones de 6% en peso de  $NaNO_3$  / 23% en peso de  $KNO_3$  / 8% en peso de  $LiNO_3$  / 19% en peso de  $Ca(NO_3)_2$  / 44% en peso de  $CsNO_3$  a  $65^\circ\text{C}$  y tiene una estabilidad térmica de hasta  $561^\circ\text{C}$  [39]. Sin embargo, se ha encontrado que los sistemas de sal de nitrato y nitrato no son térmicamente estables a temperaturas superiores a  $600^\circ\text{C}$  en una gran cantidad de trabajos de investigación. Un resumen de los HTF mencionados anteriormente se encuentra en la **Tabla 5**.

El Departamento de Energía de EE. UU. se ha propuesto trabajar con sales de alta temperatura ( $800^\circ\text{C}$ ) para CSP. Esto hace posible lograr el ciclo de energía de Brayton, que puede aumentar aún más la eficiencia de la energía térmica. Por lo tanto, se propone recientemente reemplazar la sal de nitrato-nitrato fundida con otros tipos de sales para posiblemente aumentar las temperaturas relevantes a  $800^\circ\text{C}$  e incluso hasta  $1000^\circ\text{C}$ .

Cientos de sales inorgánicas y compuestos de sal para HTF y almacenamiento de calor latente a temperaturas que oscilan entre 120 y  $1000^\circ\text{C}$  se enumeran en el documento de revisión de Kenisarin [67]. Estos materiales se basan en cloruros, fluoruros, bromuros, hidróxidos, nitratos, carbonatos y otras sales. Descubrió que casi ninguna sal inorgánica única posee propiedades decentes para servir como un HTF cualificado.

Name	Formula	$T_{\text{melt}} (^\circ\text{C})$	$T_{\text{max}} (^\circ\text{C})$
Therminal VP-1	$(C_{12}H_{10})$ and $(C_{12}H_{10}O)$ . Percentage not know.	12	390
Solar Salt	wt. 60% $NaNO_3$ / 40% $KNO_3$	220	600
Hitec	wt. 53% $KNO_3$ / 7% $NaNO_3$ / 40% $NaNO_2$	142	454–538
Hitec XL	wt. 48% $Ca(NO_3)_2$ / 7% $NaNO_3$ / 45% $KNO_3$	133	500
NS-1	wt. 44% $Ca(NO_3)_2$ / 12% $NaNO_3$ / 44% $KNO_3$	127.6	622
NS-2	wt. 25.9% $LiNO_3$ / 20.0% $NaNO_3$ / 54.1% $KNO_3$	118	435
NS-3	wt. 30% $LiNO_3$ / 18% $NaNO_3$ / 52% $KNO_3$	120	550
NS-4	wt. 50-80% $KNO_3$ / 0-25% $LiNO_3$ / 10-45% $Ca(NO_3)_2$	100	500
NS-5	wt. 17.77% $LiNO_3$ / 15.28% $NaNO_3$ / 35.97% $KNO_3$ / 30.98% $2KNO_3 \cdot Mg(NO_3)_2$	100	
NS-6	wt. 17.5% $LiNO_3$ / 14.2% $NaNO_3$ / 50.5% $KNO_3$ / 17.8% $NaNO_2$	99	500
NS-7	wt. 6% $NaNO_3$ / 23% $KNO_3$ / 8% $LiNO_3$ / 19% $Ca(NO_3)_2$ / 44% $CsNO_3$	65	561

**Tabla 5:** Nombre, Fórmula, temperatura de fusión y temperatura máxima de degradación de las sales mencionadas.

### Propiedades de varias sales populares de halogenuro en estado fundido:

En esta sección, se proporcionan las propiedades térmicas y de transporte de las cinco especies únicas de sal fundida ( $AlCl_3$ ,  $ZnCl_2$ ,  $FeCl_3$ ,  $NaCl$ ,  $KCl$ ) para referencia y evaluación sobre si una sal puede contribuir a una mejor propiedad de una posible sal eutéctica.

### 4.3 Cloruro de aluminio ( $AlCl_3$ )

Esta sal tiene un punto de fusión relativamente bajo que es  $T_m = 465 \text{ K}$  ( $192^\circ\text{C}$ ) [68]. Sin embargo, alcanza la sublimación a una temperatura de  $180^\circ\text{C}$ . Las propiedades de  $AlCl_3$  [68] fundido se muestran en la **Figura 11**. Las propiedades en función de las temperaturas vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\rho = 3,7660038 - 1,3346 * 10^{-2}T + 2,7622 * 10^{-5}T^2 - 2,2331268 * 10^{-8}T^3 \quad (1)$$

donde las unidades son  $\rho$  ( $g/cm^3$ ),  $T$  (K) en el rango de 465-560 K.

$$\mu = 3,2146 - 9,6606 * 10^{-3}T + 7,4554 * 10^{-6}T^2 \quad (2)$$

donde la unidad de viscosidad es  $10^{-3}$  (Pa s), y la temperatura está en K, en el rango de 470-560K. Las bajas viscosidades pueden hacer que el  $AlCl_3$  sea un componente muy bueno para una mezcla de sal eutéctica, ya que la baja viscosidad es importante para el HTF.

$$P_{vap} = 10^{(7,42055 - 194855/T)} \quad (3)$$

donde la unidad de presión es  $P_{vap}$  (mm \* Hg = 133.32 Pa), y la temperatura está en K, en el rango de 455-530K.

La capacidad calorífica específica del  $AlCl_3$  líquido no varía mucho en un amplio rango de temperaturas que oscilan entre 466 y 1500 K, que es alrededor de  $C_p = 125.5 \text{ J/mol} * \text{K}$  o equivalente a  $941.2 \text{ J/kg} * \text{K}$  [69].

Las presiones de vapor de  $AlCl_3$  son bastante altas y no son favorables como un fluido de transferencia de calor. Por lo tanto, se espera que las sales iónicas en una mezcla eutéctica con  $AlCl_3$  puedan crear enlaces intermoleculares para suprimir la presión de vapor. No se han encontrado datos de conductividad térmica para el  $AlCl_3$  líquido en el estudio actual.

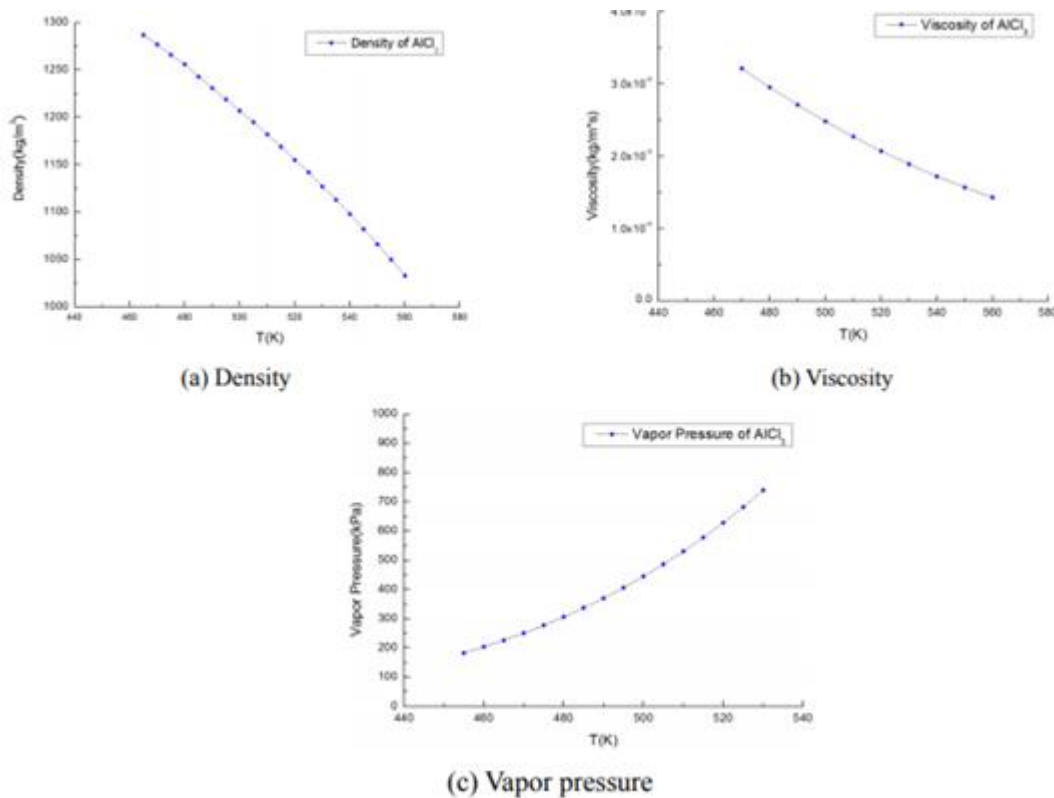


Figura 11: Propiedades de la sal fundida de  $AlCl_3$  a diferentes temperaturas [68].

#### 4.4 Cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ )

Debido al bajo punto de fusión y la presión de vapor relativamente baja, el  $ZnCl_2$  es una especie muy importante en la familia de las sales de haluros para contribuir a un bajo punto de fusión en la sal eutéctica. El punto de fusión de  $ZnCl_2$  es  $T_m = 556$  K ( $283^\circ C$ ) [70]. Otras propiedades se resumen a continuación:

La densidad, la viscosidad y la presión de vapor del  $ZnCl_2$  fundido en función de las temperaturas se muestran en la Figura 12. Las expresiones de estas propiedades se dan en las ecuaciones. (4) - (6)

$$\rho = 2,424 - 0,00046 * (T - 773) \quad (4)$$

donde las unidades son  $\rho$  ( $g/cm^3$ ), T (K), y las ecuaciones son aplicables en un rango de temperaturas de 758.7-823.7 K.

$$\ln(\mu) = 0,2686 - 2665730,8 * \frac{\ln(T)}{T^2} + 19840539/T^2 \quad (5)$$

donde  $\mu$  está en cp o  $10^{-3}$  Pa s, y T está en (K); El rango de temperaturas está en 571-893K.

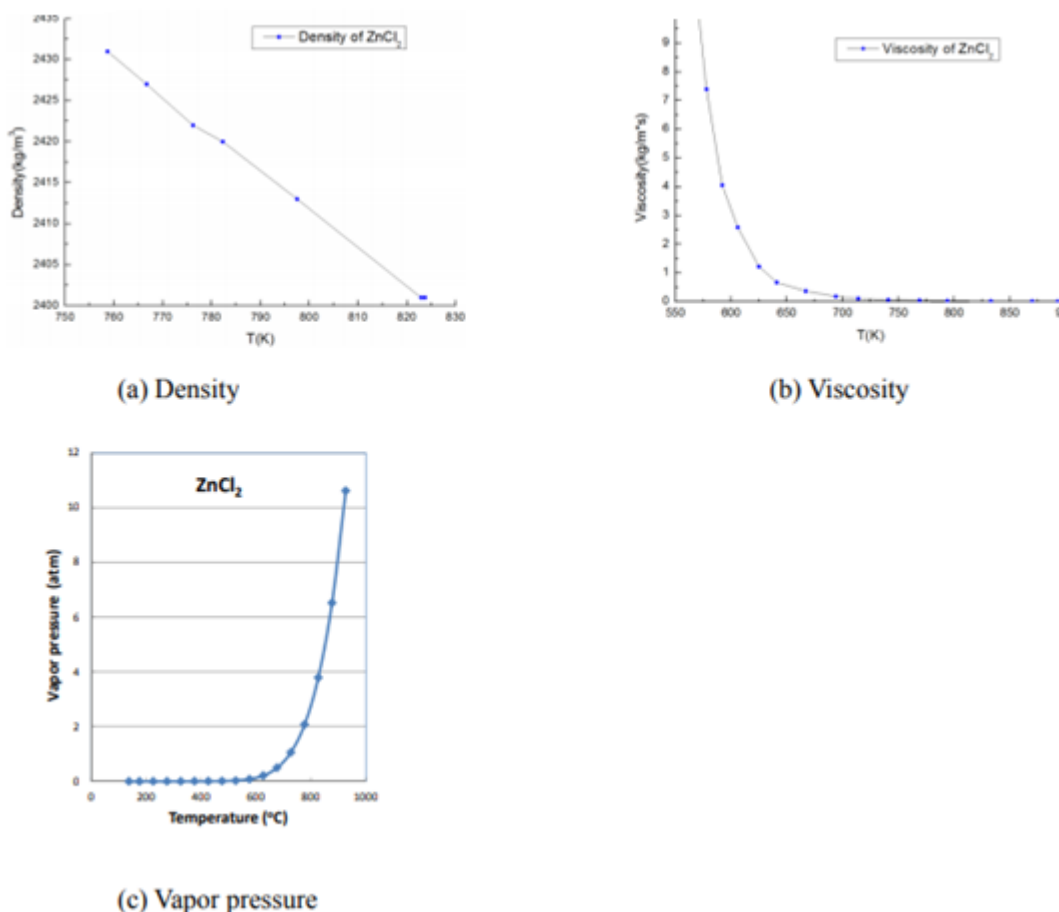
Es interesante ver en la Figura 12 (b) que la viscosidad a bajas temperaturas es alta pero disminuye dramáticamente cuando la temperatura aumenta. La baja viscosidad a alta temperatura es ventajosa; mientras que la alta viscosidad a bajas temperaturas debe modificarse agregando otros componentes en una mezcla de sal eutéctica.

La presión de vapor del  $ZnCl_2$  líquido es relativamente baja en comparación con la de  $AlCl_3$ . Como se muestra en la **Figura 12** (c), la presión de vapor del  $ZnCl_2$  es bastante baja a temperaturas por debajo de 600°C y a aproximadamente 800°C la presión de vapor alcanza los 2.0 atm. La correlación de la presión de vapor y la temperatura reportada por Keneshea y Cubicciotti [71] está en la forma de

$$\log p(mmHg) = \left(-8415,2/T\right) - 5,034\log T + 26,420 \quad (6)$$

donde la unidad de temperatura es K,  $mm \cdot Hg = 133.32 \text{ Pa}$ . La presión de vapor relativamente baja de  $ZnCl_2$  en comparación con la de  $AlCl_3$  hace que sea un componente más favorable para contribuir a una presión de vapor relativamente baja en una mezcla de sal eutéctica.

La capacidad calorífica específica en el rango de temperatura de 591-973K es de aproximadamente 24.1 cal / mol \* K [72], o 739.54 J / (kg K). En los recientes estudios no se pudo encontrar conductividades térmicas para el  $ZnCl_2$  fundido.



**Figura 12:** Propiedades de la sal fundida de  $ZnCl_2$  [71,73,74].

## 4.5 Cloruro de hierro ( $FeCl_3$ )

El punto de fusión de la sal  $FeCl_3$  es  $T_m = 555 \text{ K}$  (282 °C) [70]. La capacidad calorífica específica del  $FeCl_3$  fundido es  $C_p = 133.89 \text{ J / mol} \cdot \text{K}$  o  $825.43 \text{ J / kg} \cdot \text{K}$  en el rango de temperatura de 577-1500 K.

Esta sal tiene una presión de vapor bastante alta, como se muestra en la **Figura 13**. A aproximadamente 340°C,

la presión de vapor ya alcanza los 2 atm. Para que esta sal sea un componente de una mezcla de sal eutéctica, su alta presión de vapor puede ser un gran problema. No se encontraron otras propiedades para el  $FeCl_3$ .

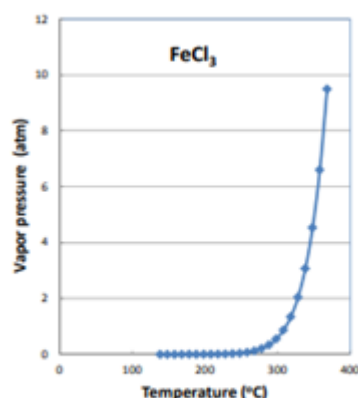
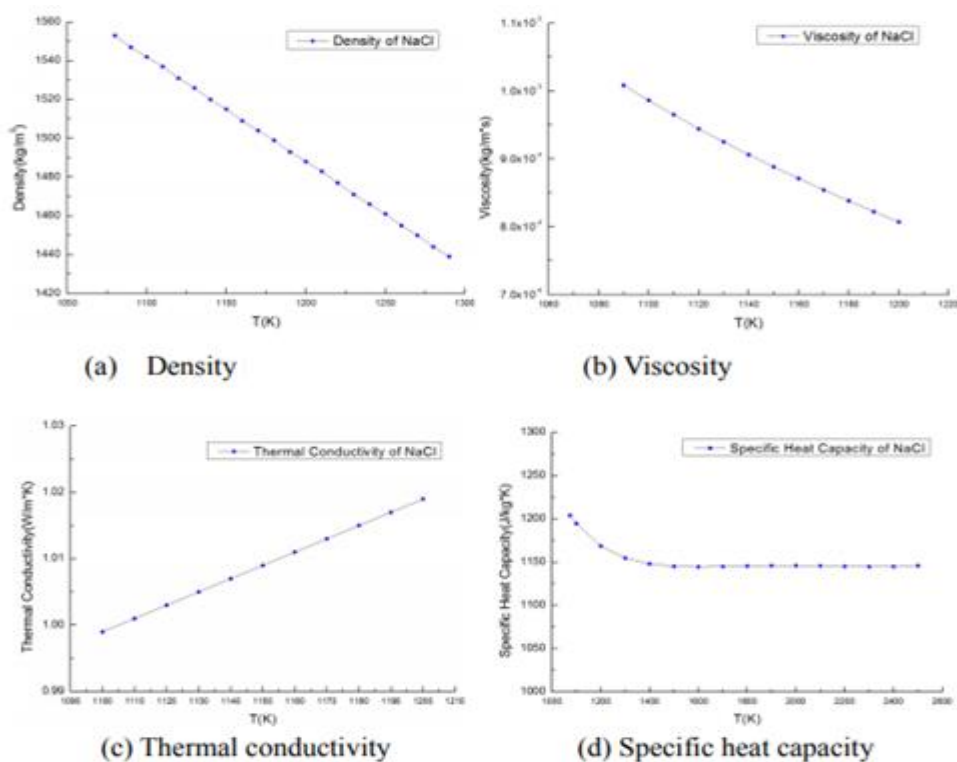
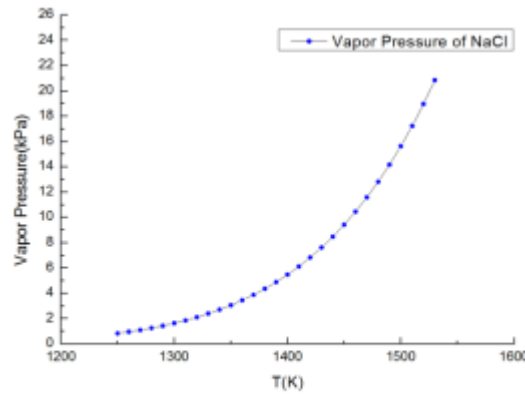


Figura 13: Presión de vapor del  $FeCl_3$  líquido [75].

#### 4.6 Cloruro de sodio ( $NaCl$ )

El NaCl tiene un punto de fusión de  $T_m = 1075$  K ( $802^\circ\text{C}$ ) [68]. NaCl también tiene una reserva casi ilimitada en el agua de mar (gran disponibilidad) y, por lo tanto, tiene un costo relativamente bajo. Las propiedades de NaCl fundido se examinan y dan en la Figura 14.





(e) Vapor pressure

**Figura 14: Propiedades del NaCl fundido frente a las temperaturas [68].**

Las correlaciones de las propiedades se dieron en las ecuaciones. (7) a (9). Por densidad hay

$$\rho = 2,1393 - 5,430 * 10^{-4}T \quad (7)$$

donde las unidades son  $\rho$  ( $g/cm^3$ ) y  $T$  (K). La ecuación es aplicable en el rango de temperaturas de 1080-1290 K.

La expresión de viscosidad también es

$$\mu = 0,08931 \exp\left(\frac{5248,1}{RT}\right) \quad (8)$$

la unidad de viscosidad es  $\mu$  (cp) y la temperatura es  $T$  (K), el rango de temperaturas para esta ecuación es 1090-1200 K y la constante de gas universal es  $R = 1.98716$  (cal / K \* mol). La viscosidad relativamente baja del NaCl fundido es favorable para su uso como componente en una mezcla de sal eutéctica, que necesita tener bajas viscosidades a altas temperaturas.

La expresión de la conductividad térmica es

$$k = 1,868 * 10^{-3} + 4,73 * 10^{-7}T \quad (9)$$

donde  $k$  es la unidad de (cal / cm \* s \* K = 418.4 W / m-K), y  $T$  está en (K), para el rango de 1100-1200 K.

La expresión de la capacidad calorífica específica.

$$C_p = -42,4478 + 113,526 * t - 43,6466 * t^2 + 5,89663 * t^3 + \frac{39,1386}{t^2} \quad (10)$$

donde la unidad de  $C_p$  es J / (mol \* K),  $t = T$  (K) / 1000, y  $T$  está en (K). La ecuación es aplicable en un rango

de temperaturas de 1074 K a 2500 K.

La presión de vapor en un estrecho rango de temperatura para NaCl fundido se expresa como:

$$P_{vap} = 10^{(8,4459 - 9565/T)} \quad (11)$$

donde  $P_{vap}$  está en (mm \* Hg = 133.32Pa),  $T$  está en (K) y el rango de temperatura para la ecuación es 1250-1530 K. La baja presión de vapor del NaCl fundido es muy favorable para un fluido de transferencia de calor.

## 4.7 Cloruro de potasio (KCl)

El cloruro de potasio tiene un punto de fusión de  $T_m = 1043$  K (770 C) [68]. Las propiedades dadas para la sal fundida KCl se dan en la **Figura 15**. Las expresiones correspondientes de las propiedades contra las temperaturas para las curvas se dan en las ecuaciones. (12) a (15).

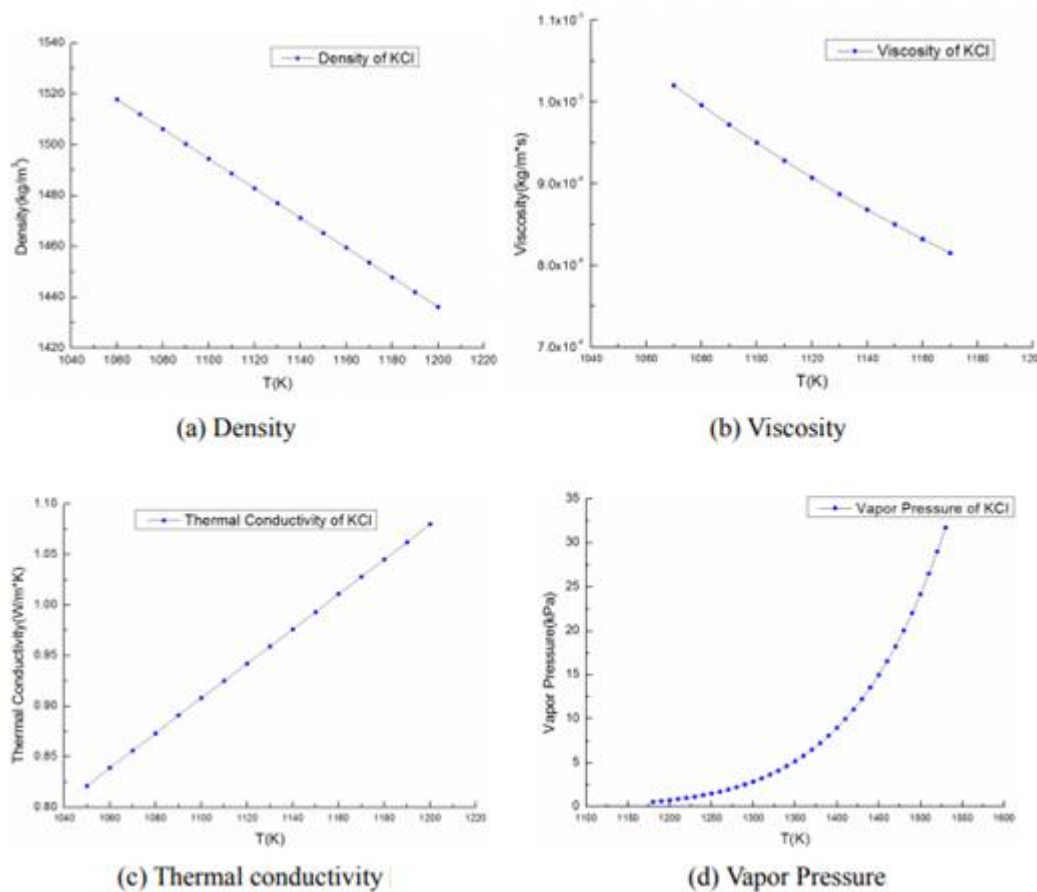


Figura 15: Propiedades del KCl fundido frente a las temperaturas [68].

Para la densidad, hay

$$\rho = 2,1359 - 5,831 \cdot 10^{-4}T \quad (12)$$

que es aplicable en un rango de temperatura de 1060-1200 K, la unidad de densidad es  $\rho$  ( $g/cm^3$ ) y para T es (K). Por viscosidad hay

$$\mu = 0,0732 \exp\left(\frac{5601,7}{RT}\right) \quad (13)$$

donde la unidad de viscosidad es  $\mu$  (cp o  $10^{-3}$  Pa s), T (K) es la temperatura y  $R = 1.98716$  (cal / K \* mol).

La ecuación es aplicable en un rango de 1070-1170 K. Las viscosidades relativamente bajas de esta sal fundida lo convierten en un componente favorable para una mezcla de sal eutéctica. La conductividad térmica es

$$k = -23,43 * 10^{-4} + 4,103 * 10^{-6} T \quad (14)$$

donde K es la unidad de cal / (cm \* s \* K = 418.4 W / mK), la temperatura T tiene la unidad de (K), y las ecuaciones son aplicables en el rango de 1050-1200 K. Las conductividades térmicas de la sal fundida KCl son ligeramente más bajos que los de NaCl fundido.

$$P_{vap} = 10^{(8,2800 - 9032/T)} \quad (15)$$

donde  $P_{vap}$  (mm \* Hg = 133.32 Pa) es una presión de vapor, y T (K) es una temperatura que está en el rango de 1180-1530 K. Obviamente, la baja presión de vapor del KCl fundido es útil para su uso en una sal eutéctica mezcla.

La capacidad calorífica específica del KCl fundido es aproximadamente  $C_p = 73.6$  J / mol \* K = 987.24 J / kg \* K en el rango de temperatura de 1044-2000 K.

### Propiedades de la sal fundida binaria

En esta parte se describen las propiedades de las sales binarias fundidas de  $NaCl + AlCl_3$ ,  $KCl + AlCl_3$ . Las composiciones mencionadas en el trabajo están todas basadas en fracciones molares. Tanto las sales covalentes  $AlCl_3$  como  $ZnCl_2$  tienen un punto de fusión bajo, mientras que las sales iónicas NaCl y KCl tienen puntos de ebullición relativamente altos o estabilidad a alta temperatura. Por lo tanto, es prometedor que la mezcla de sales eutécticas covalentes e iónicas tiene el potencial de poseer tanto un punto de fusión bajo como una buena estabilidad a altas temperaturas.

## 4.8 Mezcla de $NaCl + AlCl_3$

El punto de fusión eutéctico para  $NaCl + AlCl_3$  es generalmente bajo. Por ejemplo, la mezcla en fracción molar de  $NaCl$  al 36.8% +  $AlCl_3$  al 63.2% tiene un punto de fusión de  $T_m = 378-381$  K (105-108°C) [68].

Las densidades de la mezcla de sal de  $NaCl + AlCl_3$  en tres composiciones en estado fundido a diferentes temperaturas se dan en la **Tabla 6**, que también se representan en la **Figura 16** (a). Cuanto más NaCl se incluye en la mezcla, más altas son las densidades.



T(K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		
	27% NaCl + 73% AlCl <sub>3</sub>	38.2% NaCl + 61.8% AlCl <sub>3</sub>	48% NaCl + 52% AlCl <sub>3</sub>
400			1733
410			1724
420			1716
430			1708
440		1653	1699
450		1644	1691
460	1588	1635	1682
470	1579	1627	1674
480	1570	1618	1666
490	1561	1609	1657
500	1551	1601	1649
510	1542	1592	1641
520	1533	1583	1632
530	1524	1575	1624
540	1515	1566	1615
550	1505		1607
560	1496		1598
570	1487		
580	1478		
590	1469		
600	1459		
610	1450		
27%NaCl + 73%AlCl <sub>3</sub> : $\rho = 2011 - 0.92 \times T$ , Temperature Range : 460–610K (16)			
38.2%NaCl + 61.8%AlCl <sub>3</sub> : $\rho = 2034 - 0.866 \times T$ , Temperature Range : 440–540K (17)			
48%NaCl + 52%AlCl <sub>3</sub> : $\rho = 2068 - 0.838 \times T$ , Temperature Range : 400–560K (18)			
where $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) is density and T(K) is temperature.			

**Tabla 6:** Densidad de la sal fundida de *NaCl* + *AlCl*<sub>3</sub> (% en moles) [68].

Las viscosidades de la mezcla de sal fundida de *NaCl* + *AlCl*<sub>3</sub> en siete composiciones se obtienen de la literatura [68] que se proporciona en la **Tabla 7** y se ilustra en la **Figura 16** (b). Las bajas viscosidades son favorables para las sales fundidas eutécticas que se utilizan como fluidos de transferencia de calor.

T(K)	$\mu(\text{kg/m}^2\text{s})$						
	50%NaCl 50%AlCl <sub>3</sub>	45%NaCl 55%AlCl <sub>3</sub>	40.01%NaCl 59.99%AlCl <sub>3</sub>	35.04%NaCl 64.96%AlCl <sub>3</sub>	30.08%NaCl 69.92%AlCl <sub>3</sub>	25.20%NaCl 74.80%AlCl <sub>3</sub>	20.28%NaCl 79.72%AlCl <sub>3</sub>
450			0.0003469	0.0003667			
460	0.0002645	0.000286	0.0003174	0.0003339	0.0003246		
470	0.000245	0.000264	0.0002914	0.0003053	0.000296	0.000259	
480	0.0002277	0.000245	0.0002686	0.0002802	0.0002709	0.000237	0.0001848
490	0.0002123	0.000228	0.0002483	0.000258	0.0002489	0.0002177	0.0001697
500	0.0001984	0.000212	0.0002304	0.0002384	0.0002294	0.0002006	0.0001564
510	0.0001859	0.000199	0.0002143	0.000221	0.0002121	0.0001854	0.0001445
520	0.0001747	0.000186	0.0001999	0.0002054	0.0001967	0.000172	0.000134
530	0.0001645	0.000175	0.000187	0.0001915	0.000183	0.0001599	0.0001246
540	0.0001553	0.000165	0.0001753	0.0001789	0.0001707	0.0001491	0.0001162
550	0.0001469	0.000155	0.0001648	0.0001676	0.0001596	0.0001394	0.0001086
560	0.0001392	0.000147	0.0001552	0.0001574	0.0001496	0.0001306	0.0001017
570	0.0001322	0.000139	0.0001465	0.0001481	0.0001405	0.0001227	0.0000955
$50\%\text{NaCl} + 50\%\text{AlCl}_3 : \mu = 7.2702 \times 10^{-6} \exp(3285.3/RT), \text{ Range : } 460\text{--}570 \text{ K}$							(19)

Tabla 7: Viscosidad de *NaCl* + *AlCl<sub>3</sub>* líquido (% en moles) [68].

$$45\%\text{NaCl} + 55\%\text{AlCl}_3 : \mu = 6.8398 \times 10^{-6} \exp(3413.5/RT), \text{ Range : } 460\text{--}570 \text{ K} \quad (20)$$

$$40.01\%\text{NaCl} + 59.99\%\text{AlCl}_3 : \mu = 5.7828 \times 10^{-6} \exp(3661.1/RT), \text{ Range : } 450\text{--}570 \text{ K} \quad (21)$$

$$35.04\%\text{NaCl} + 64.96\%\text{AlCl}_3 : \mu = 4.9477 \times 10^{-6} \exp(3850.2/RT), \text{ Range : } 450\text{--}570 \text{ K} \quad (22)$$

$$30.08\%\text{NaCl} + 69.92\%\text{AlCl}_3 : \mu = 4.2341 \times 10^{-6} \exp(3966.7/RT), \text{ Range : } 460\text{--}570 \text{ K} \quad (23)$$

$$25.20\%\text{NaCl} + 74.80\%\text{AlCl}_3 : \mu = 3.6622 \times 10^{-6} \exp(3977.5/RT), \text{ Range : } 470\text{--}570 \text{ K} \quad (24)$$

$$20.28\%\text{NaCl} + 79.72\%\text{AlCl}_3 : \mu = 2.8309 \times 10^{-6} \exp(3985.8/RT), \text{ Range : } 480\text{--}570 \text{ K} \quad (25)$$

where  $\mu(\text{kg/m}^2\text{s})$  is viscosity,  $T(\text{K})$  is temperature, and  $R = 1.98716 \text{ (cal/K}^*\text{mol)}$ .

Hay un número muy limitado de datos para la conductividad térmica de *NaCl* + *AlCl<sub>3</sub>* [68]. Para una mezcla en fracción molar de *NaCl* al 27% + *AlCl<sub>3</sub>* al 73% (con un punto de fusión de 460 K), la conductividad térmica del líquido a 467 K es de 0.2217 W / (m K). Las presiones de vapor de *NaCl* + *AlCl<sub>3</sub>* en una docena de composiciones diferentes se muestran en la **Tabla 8** y en la **Figura 16** (c). Las ecuaciones correspondientes de la presión de vapor también se proporcionan en la **Tabla 8**.

T(K)	$P_{vap}$ (kPa)											
	46.21%	45.75%	44.49%	41.94%	39.02%	37.32%	36.94%	34.10%	33.96%	30.72%	29.75%	26.07%
	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl	NaCl
	53.79%	54.25%	55.51%	58.06%	60.98%	62.68%	63.06%	65.90%	66.04%	69.28%	70.25%	73.93%
	AlCl <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub>
380				0.311								
390				0.453								
400				0.647								
410				0.908	1.871	2.994	3.942					
420		0.381	0.52	1.255	2.629	4.142	5.366					
430		0.511	0.687	1.707	3.636	5.645	7.199	17.715	15.76			
440	0.653	0.676	0.895	2.29	4.954	7.585	9.53	22.465	20.608	45.547		
450	0.803	0.884	1.153	3.033	6.658	10.058	12.46	28.19	26.658	57.151	66.171	
460	0.977	1.143	1.469	3.969	8.835	13.176	16.101	35.026	34.081	71.009	82.26	142.171
470	1.18	1.461	1.852	5.134	11.583	17.064	20.581	43.12	43.119	87.414	101.318	173.96
480	1.413	1.848		6.57	15.015	21.861	26.039	52.626	54.02	106.681	123.714	211.076
490	1.681	2.316		8.325	19.26	27.726	32.631	63.708	67.858	129.14		254.098
500		2.876		10.447	24.458	34.83	40.523	76.536	82.525	155.139		303.627
510		3.541		12.995	30.771	43.367	49.9	91.288	100.738	185.034		360.285
520		4.325		16.028	38.373	53.541	60.955	108.15	122.03	219.201		424.712
46.21%NaCl + 53.79%AlCl <sub>3</sub> : $P_{vap} = 10^{(4.71496-1771/T)} / 760 \times 101.325$ , Range : 440–490K (26)												
45.75%NaCl + 54.25%AlCl <sub>3</sub> : $P_{vap} = 10^{(5.94281-23045/T)} / 760 \times 101.325$ , Range : 420–520K (27)												
44.487%NaCl + 55.513%AlCl <sub>3</sub> : $P_{vap} = 10^{(5.77583-21775/T)} / 760 \times 101.325$ , Range : 420–470K (28)												
41.938%NaCl + 58.062%AlCl <sub>3</sub> : $P_{vap} = 10^{(6.72729-24166/T)} / 760 \times 101.325$ , Range : 380–520K (29)												
39.023%NaCl + 60.977%AlCl <sub>3</sub> : $P_{vap} = 10^{(7.34912-25428/T)} / 760 \times 101.325$ , Range : 410–520K (30)												
37.323%NaCl + 62.677%AlCl <sub>3</sub> : $P_{vap} = 10^{(7.27205-24275/T)} / 760 \times 101.325$ , Range : 410–520K (31)												
36.954%NaCl + 63.046%AlCl <sub>3</sub> : $P_{vap} = 10^{(7.09260-23049/T)} / 760 \times 101.325$ , Range : 410–520K (32)												
34.096%NaCl + 65.904%AlCl <sub>3</sub> : $P_{vap} = 10^{(6.66296-19520/T)} / 760 \times 101.325$ , Range : 430–520K (33)												
33.964%NaCl + 66.036%AlCl <sub>3</sub> : $P_{vap} = 10^{(7.20848-22084/T)} / 760 \times 101.325$ , Range : 430–520K (34)												
30.723%NaCl + 69.277%AlCl <sub>3</sub> : $P_{vap} = 10^{(6.96901-19516/T)} / 760 \times 101.325$ , Range : 440–520K (35)												
29.745%NaCl + 70.255%AlCl <sub>3</sub> : $P_{vap} = 10^{(7.04376-19566/T)} / 760 \times 101.325$ , Range : 450–480K (36)												
26.071%NaCl + 73.929%AlCl <sub>3</sub> : $P_{vap} = 10^{(7.14703-18948/T)} / 760 \times 101.325$ , Range : 460–520K (37)												
where $P_{vap}$ (kPa) is vapor pressure and T(K) is temperature.												

Tabla 8: Presión de vapor de NaCl + AlCl<sub>3</sub> (% en moles) [68].

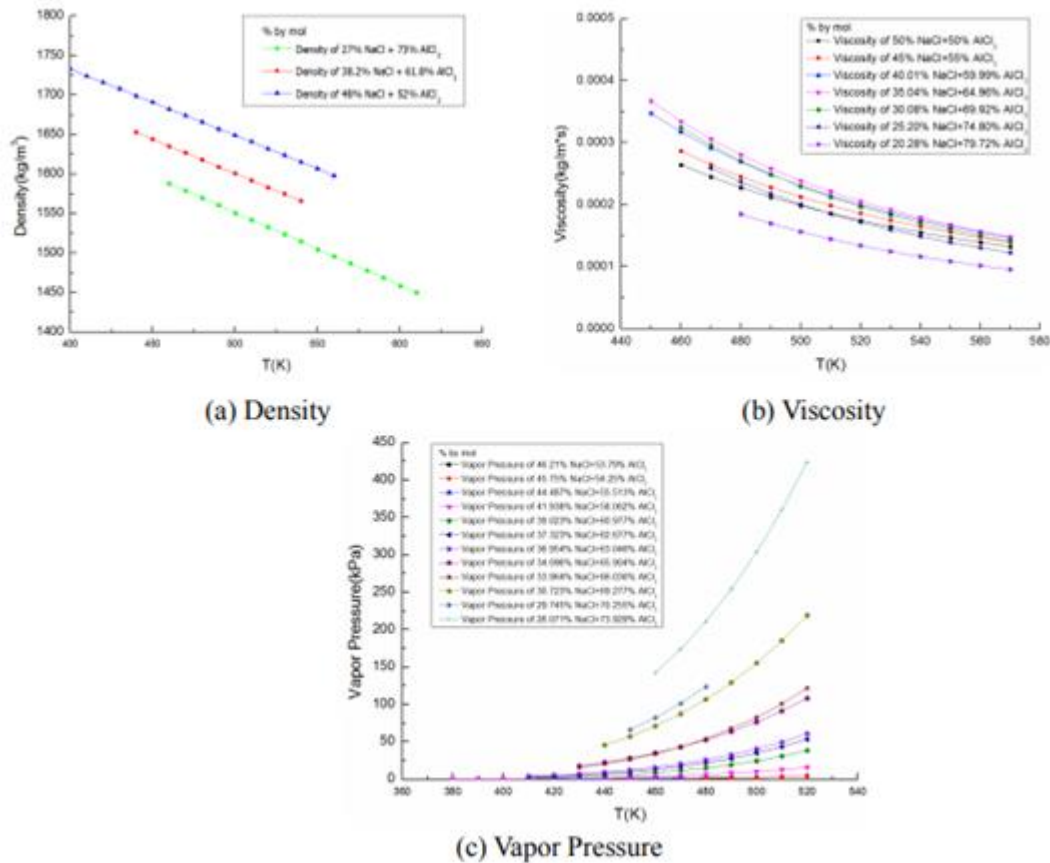


Figura 16: Propiedades de la mezcla de sal fundida  $NaCl + AlCl_3$  [68].

#### 4.9 Mezcla de $KCl + AlCl_3$

El punto de fusión de este sistema de sal binario es relativamente bajo. Para la composición molar de  $KCl$  al 33% +  $AlCl_3$  al 67%, hay  $T_m = 401$  K ( $128^\circ C$ ) [68]. Las densidades para mezclas en cuatro composiciones diferentes a diferentes temperaturas se muestran en la **Tabla 9** y se muestran en la **Figura 17** (a) [68].

Las presiones de las mezclas en cuatro composiciones diferentes se muestran en la **Tabla 10** y la **Figura 17** (b) [68].

T(K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )			
	20%KCl 80%AlCl <sub>3</sub>	33.33%KCl 66.67%AlCl <sub>3</sub>	50.03%KCl 49.97%AlCl <sub>3</sub>	52.78%KCl 47.22%AlCl <sub>3</sub>
480	1543			
500	1523	1594		

520	1503	1578		
540	1483	1562		
560		1547		
580		1531		
600		1515		
620		1499		
640		1483		
660		1468		
680		1452		
700		1436		
720		1420		
740		1404	1466	
760		1389	1452	
780		1373	1439	
800			1426	
820			1413	
840			1399	
860			1386	
880			1373	
900			1360	
920			1346	
940			1333	
960			1320	1388
980			1307	1376
1000			1293	1363
1020			1280	1351
1040			1267	1339
<hr/>				
20%KCl + 80%AlCl <sub>3</sub> :		$\rho = 2025.2 - 1.0038 \times T$ , Range : 480–540K		(38)
33.33%KCl + 66.67%AlCl <sub>3</sub> :		$\rho = 1988.9 - 0.7901 \times T$ , Range : 500–780K		(39)
50.03%KCl + 49.97%AlCl <sub>3</sub> :		$\rho = 1955.6 - 0.6622 \times T$ , Range : 740–1040K		(40)
66.66%KCl + 33.34%AlCl <sub>3</sub> :		$\rho = 1973.4 - 0.6101 \times T$ , Range : 960–1040K		(41)
where $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) is density and T(K) is temperature.				

Tabla 9: Densidad de *KCl líquido* + *AlCl<sub>3</sub>* (% en moles) [68].

T(K)	P <sub>vap</sub> ( kPa)			
	49.9%KCl + 50.01%AlCl <sub>3</sub>	51.5%KCl + 48.5%AlCl <sub>3</sub>	57.6%KCl + 42.4%AlCl <sub>3</sub>	63.8%KCl + 36.2%AlCl <sub>3</sub>
870	0.613			
880	0.72			
890	0.867			
900	1.027			
910	1.2	0.547		
920	1.413	0.68	0.587	
930	1.653	0.84	0.72	
940	1.933	1.04	0.88	
950	2.24	1.267	1.08	0.907
960	2.6	1.547	1.307	1.08
970	3.013	1.88	1.573	1.293



980	3.466	2.28	1.893	1.547
990	3.986	2.746	2.28	1.827
1000	4.573	3.293	2.72	2.173
1010	5.226	3.933	3.226	2.56
1020	5.96	4.693	3.84	3
1030	6.773	5.573	4.533	3.52
1040	7.679	6.599		
1050	8.693	7.786		
1060	9.813	9.159		
1070	11.052	10.732		

49.9%KCl + 50.01%AlCl <sub>3</sub> :	$P_{\text{vap}} = (10^{7.395-5860/T})/760 \times 101.325,$	Range: 870–1070K	(42)
51.5%KCl + 48.5%AlCl <sub>3</sub> :	$P_{\text{vap}} = (10^{9.2386-7846/T})/760 \times 101.325,$	Range: 910–1070K	(43)
57.6%KCl + 42.4%AlCl <sub>3</sub> :	$P_{\text{vap}} = (10^{8.943-7634/T})/760 \times 101.325,$	Range: 920–1030K	(44)
63.8%KCl + 36.2%AlCl <sub>3</sub> :	$P_{\text{vap}} = (10^{8.4231-7212/T})/760 \times 101.325,$	Range: 950–1030K	(45)

where  $P_{\text{vap}}$  is in kPa, unit of temperature is in K.

Tabla 10: Presión de vapor del líquido  $KCl + AlCl_3$  [68].

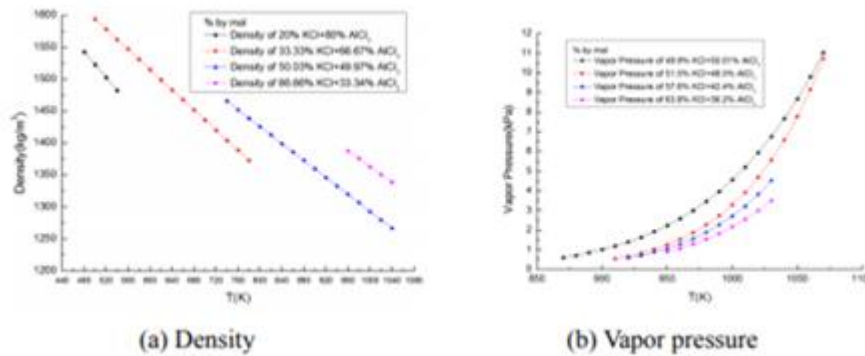


Figura 17: Propiedades de la mezcla de sal fundida  $KCl + AlCl_3$  [68].

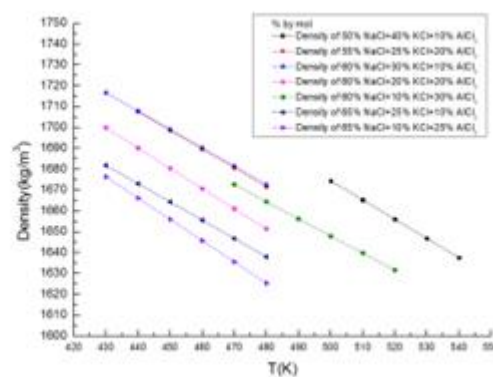
### Propiedades de los Sistemas de Sal Ternaria Fundida

En esta sección se estudió las propiedades de dos sales fundidas ternarias,  $NaCl + KCl + AlCl_3$  y  $NaCl + KCl + ZnCl_2$ . Todas las composiciones mencionadas se basan en la fracción molar.

#### 4.10 $NaCl + KCl + AlCl_3$

Hay dos puntos eutécticos para  $NaCl + KCl + AlCl_3$  [68]. El que tiene una composición de 20% de  $NaCl + 16.5\%$  de  $KCl + 63.5\%$  de  $AlCl_3$  tiene un punto de fusión de  $T_m = 361.9$  K (88.9°C). Las densidades de la sal ternaria con diferentes composiciones a diferentes temperaturas se dan en la **Tabla 11** y la **Figura 18**. No se han encontrado datos de presión de vapor para este sistema ternario. Sin embargo, la alta presión de vapor de  $AlCl_3$  puede hacer que este sistema sea problemático y, por lo tanto, no adecuado como HTF.

T(K)	$\rho(\text{kg/m}^3)$						
	50%NaCl +40%KCl +10%AlCl <sub>3</sub>	55%NaCl +25%KCl +20%AlCl <sub>3</sub>	60%NaCl +30%KCl +10%AlCl <sub>3</sub>	60%NaCl +20%KCl +20%AlCl <sub>3</sub>	60%NaCl +10%KCl +30%AlCl <sub>3</sub>	65%NaCl +25%KCl +10%AlCl <sub>3</sub>	65%NaCl +10%KCl +25%AlCl <sub>3</sub>
430			1716.7	1699.9		1681.9	1676.4
440		1707.7	1707.9	1690.2		1673.1	1666.2
450		1698.7	1699.1	1680.5		1664.4	1656.0
460		1689.6	1690.3	1670.8		1655.6	1645.8
470		1680.6	1681.5	1661.1	1672.7	1646.8	1635.6
480		1671.6	1672.6	1651.4	1664.4	1638.0	1625.4
490					1656.2		
500	1674.5				1648.0		
510	1665.3				1639.8		
520	1656.0				1631.6		
530	1646.8						
540	1637.6						
50%NaCl+40%KCl+10%AlCl <sub>3</sub> : $\rho = 2136 - 0.923 \times T$ , for T(K) in 500–540K (46)							
55%NaCl+25%KCl+20%AlCl <sub>3</sub> : $\rho = 2105 - 0.903 \times T$ , for T(K) in 440–480K (47)							
60%NaCl+30%KCl+10%AlCl <sub>3</sub> : $\rho = 2096 - 0.882 \times T$ , for T(K) in 430–480K (48)							
60%NaCl+20%KCl+20%AlCl <sub>3</sub> : $\rho = 2117 - 0.97 \times T$ , for T(K) in 430–480K (49)							
60%NaCl+10%KCl+30%AlCl <sub>3</sub> : $\rho = 2059 - 0.822 \times T$ , for T(K) in 470–520K (50)							
65%NaCl+25%KCl+10%AlCl <sub>3</sub> : $\rho = 2059 - 0.877 \times T$ , for T(K) in 430–480K (51)							
65%NaCl+10%KCl+25%AlCl <sub>3</sub> : $\rho = 2115 - 1.02 \times T$ , for T(K) in 960–1170K (52)							
where unit of density is $\rho(\text{kg/m}^3)$ and T is in (K).							

Tabla 11: Densidad de *NaCl* líquido + *KCl* + *AlCl*<sub>3</sub> (% en moles) [68].Figura 18: Densidades de la mezcla ternaria *NaCl* + *KCl* + *AlCl*<sub>3</sub> [68] en varias composiciones.

#### 4.11 *NaCl* + *KCl* + *ZnCl*<sub>2</sub>

Hay tres mezclas eutécticas para este sistema ternario que pueden tener temperaturas de fusión por debajo de 250°C. Una composición particular es 20% *NaCl* + 20% *KCl* + 60% *ZnCl*<sub>2</sub> que tiene un punto de fusión de  $T_m = 476 \text{ K}$  (203°C). Debido a la presión de vapor relativamente baja de *ZnCl*<sub>2</sub>, esta sal eutéctica también puede tener una presión de vapor baja y por lo tanto, es muy prometedora para ser un HTF. Las densidades de esta mezcla eutéctica se dan en la **Tabla 12** y la **Figura 19** (a). Las viscosidades de la sal se dan en la **Tabla 13** y la **Figura 19** (b).

T(K)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$\rho(\text{kg/m}^3)$
473	2.46	2462.8
483	2.46	2456.44
493	2.45	2450.08
503	2.44	2443.72
513	2.44	2437.36
523	2.43	2431
533	2.42	2424.64
543	2.42	2418.28
553	2.41	2411.92
563	2.41	2405.56
573	2.4	2399.2

$\rho = 2.59 - 6.36 \times 10^{-4}(T - 273)$ ; where the units are  $\rho(\text{kg/m}^3)$ , and T(K), in the range of 473–573K. (53)

Tabla 12: Densidades de la sal fundida 20%  $\text{NaCl}$  + 20%  $\text{KCl}$  + 60%  $\text{ZnCl}_2$  (% por mol) [76].

T(K)	$\mu(\text{cp})$	$\mu(\text{kg/m}^2\text{s})$
473	155.9932	0.15599
483	114.6464	0.11465
493	86.8344	0.08683
503	67.5008	0.0675
513	53.6699	0.05367
523	43.5235	0.04352
533	35.9132	0.03591
543	30.0916	0.03009
553	25.5594	0.02556
563	21.9752	0.02198
573	19.1002	0.0191

$\mu = 1.23 \times 10^{-2} \sqrt{T} \exp\left(\frac{1.21 \times 10^3}{T - 283}\right)$ ; where the units are  $\mu(\text{cp})$ , and T(K), within the range of 473–573K. (54)

Tabla 13: Viscosidad de la sal fundida 20%  $\text{NaCl}$  + 20%  $\text{KCl}$  + 60%  $\text{ZnCl}_2$  (% por mol) [76].

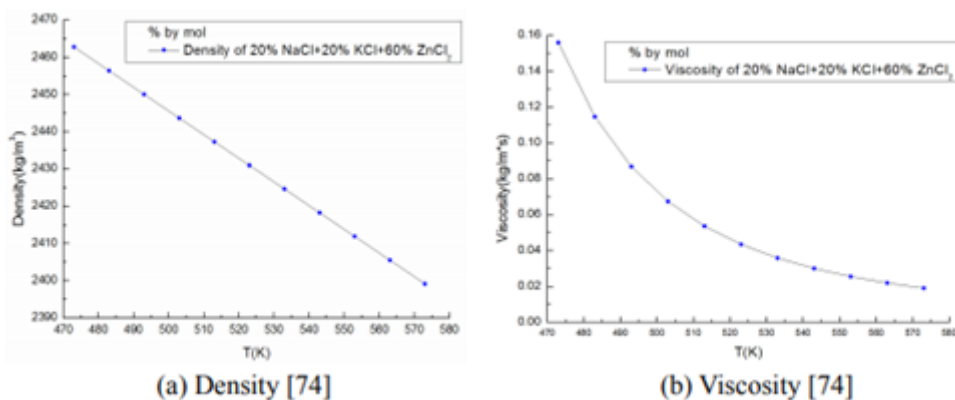


Figura 19: Propiedades de la sal (20%  $\text{NaCl}$  + 20%  $\text{KCl}$  + 60%  $\text{ZnCl}_2$  (% por mol)) [76].

En este punto se proporcionó una breve introducción a los HTF de alta temperatura disponibles en la actualidad y la necesidad de desarrollar materiales de nueva generación para temperaturas de trabajo aún más altas (al menos 800°C) con el objetivo de alcanzar altas eficiencias térmicas en plantas de energía solar térmica concentrada.

Se prestó especial atención a las posibles mezclas de sales iónicas y haluros covalentes por el potencial de crear sales eutécticas para cumplir con los criterios básicos para un HTF. El bajo costo y la reserva casi



ilimitada de sales de haluro también es importante debido a la gran demanda en la industria. En este estudio se ha encontrado que algunas sales de haluro binarias y ternarias podrían tener mezclas eutécticas con bajos puntos de fusión, que por lo tanto se recomiendan para los componentes de un HTF.

Para aquellas sales de haluro recomendadas como los componentes de una mezcla de sales fundidas eutécticas, las propiedades disponibles del candidato individual y las mezclas binarias y ternarias se examinan y presentan para referencia de estudios e investigaciones adicionales de todas las propiedades que permanecen desconocidas hasta ahora.

La **Tabla 14** resume la disponibilidad de los resultados obtenidos de la literatura. Se extraen algunas conclusiones clave:

(1) Se entiende que las tres sales de haluros covalentes de  $AlCl_3$ ,  $ZnCl_2$  y  $FeCl_3$  tienen puntos de fusión relativamente bajos que pueden contribuir al bajo punto de fusión eutéctico para una mezcla de sales de haluros iónicos y covalentes. Sin embargo, las presiones de vapor relativamente altas de  $AlCl_3$  y  $FeCl_3$  son preocupantes del posible trabajo a alta presión de vapor de las mezclas de sales eutécticas.

(2) Dos sales eutécticas binarias de  $NaCl - AlCl_3$  y  $KCl - AlCl_3$  muestran bajos puntos de fusión eutécticos por debajo de  $250^\circ C$ . El sistema de  $NaCl - AlCl_3$  todavía tiene una presión de vapor bastante alta que puede provenir de la alta presión de vapor de  $AlCl_3$ . Sin embargo, el eutéctico de  $KCl - AlCl_3$  muestra una presión de vapor relativamente más baja en comparación con la de  $NaCl - AlCl_3$ . Esta es una indicación de que el  $KCl$  es un componente importante para suprimir la presión de vapor de las mezclas eutécticas. Las viscosidades de estos dos sistemas binarios son bajas y muy favorables.

(3) Dos sales eutécticas ternarias del sistema de  $NaCl - KCl - AlCl_3$  y  $NaCl - KCl - ZnCl_2$  mostraron bajas viscosidades que son muy favorables para los fluidos de transferencia de calor. Las densidades de las dos sales eutécticas también son aceptables. Sin embargo, no hay otras propiedades térmicas y de transporte, se necesita mas investigación o no hay información disponible.

Por último, pero no menos importante, la corrosión química de las sales inspeccionadas en metales de tuberías y contenedores es un tema muy importante. Aún no se ha realizado un estudio detallado. Sin embargo, un artículo reciente [75] mostró los resultados de la corrosión de Hastelloys en el sistema eutéctico  $13.4 NaCl - 33.7 KCl - 52.9 ZnCl_2$  (% en moles).

El Hastelloy C-276 exhibió una tasa de corrosión más alta de  $40 \mu m$  por año a  $500^\circ C$ , con una tasa de corrosión más alta de  $> 150 \mu m$  por año a  $500^\circ C$ . Se espera que la corrosión de estas sales a los metales se vea en el futuro.

Con referencia a las propiedades disponibles para estas sales halogenadas, los investigadores del Instituto de Tecnología de Georgia, la Universidad de Arizona y la Universidad Estatal de Arizona han estado investigando las propiedades de los sistemas de sal ternaria ( $KCl - NaCl - AlCl_3$ ), ( $KCl - NaCl - ZnCl_2$ ), y ( $KCl - NaCl - FeCl_3$ ), así como sistemas cuaternarios. Se aplican simulaciones y métodos de selección rápida para buscar composiciones de sal eutéctica; mientras que las pruebas experimentales se siguen para medir todas las propiedades, incluida la corrosión de los metales, para evaluar la idoneidad de un HTF.

	Single Molten Salt					Binary Molten Salt			Ternary Molten Salt	
	AlCl <sub>3</sub>	ZnCl <sub>2</sub>	FeCl <sub>3</sub>	NaCl	KCl	NaCl+AlCl <sub>3</sub>	KCl+AlCl <sub>3</sub>	NaCl+KCl	NaCl+KCl +AlCl <sub>3</sub>	NaCl+KCl +ZnCl <sub>2</sub>
Density	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Viscosity	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	✓	×	✓
Thermal Conductivity	×	×	×	✓	✓	×	×	×	×	×
Specific Heat Capacity	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×	×
Vapor Pressure	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
Melting Point	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ : Data obtained from literature; × : No data available from literature

Tabla 14: Resumen de la disponibilidad de propiedades físicas de  $AlCl_3$ ,  $ZnCl_2$ ,  $FeCl_3$ ,  $NaCl$ ,  $KCl$  y sus mezclas [78].

## 4.12 Otros Estudios

La investigación de las propiedades termofísicas de las sustancias requiere bastante mano de obra y, naturalmente, no se queda atrás en el desarrollo de los nuevos materiales. Los datos sobre las propiedades termofísicas se encuentran dispersos en muchos manuales y revistas, que, a menudo, no son accesibles para una amplia cantidad de expertos. También se refiere a las sales y composiciones sobre su base. No hay suficientes publicaciones.

Metal	Fluoride	Chloride	Bromide	Iodide	Sulphate	Nitrate	Carbonate	Chromate	Molybdate	Tungstate
Melting temperature, °C										
Lithium	849	610	550	469	858	253	732	485	703	740
Sodium	996	801	742	661	884	307	858	794	688	696
Potassium	858	771	734	681	1069	335	900	973	926	923
Rubidium	795	723	692	556	1070	312	873	994	955	952
Cesium	703	645	638	632	1015	409	793	975	935	953
Magnesium	1263	714	711	633	1137	426	990		1230	826
Calcium	1418	772	742	783	1460	560	1330	1000	1449	1580
Strontium	1477	875	657	538	1605	645	1490	1283	1457	1535
Barium	1368	961	857	711	1680	594	1555	1444	1458	1475
Heat of fusion, J/g										
Lithium	1041	416	203		84	373	509	168	281	157
Sodium	794	482	255	158	165	177	165	146	109	107
Potassium	507	353	215	145	212	88	202	41	163	86
Rubidium	248	197	141	104	145	31			140	78
Cesium	143	121	111	96	101	71		94	75	63
Magnesium	938	454	214	93	122		698			
Calcium	381	253	145	142	203	145				
Strontium	226	103	41	57	196	231				
Barium	105	76	108	68	175	209				

Tabla 15: Temperatura de fusión y calor de fusión de algunas sales [79].

Salt composition (mol.%)	$T_m, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_f, \text{J/g}$
NaF(5)–87NaNO <sub>3</sub> –8NaCl	288	224
LiF(7.0)–41.5LiCl–16.4LiVO <sub>3</sub> –35.1Li <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	340	177
LiF(16.2)–42.0LiCl–17.4LiVO <sub>3</sub> – 11.6Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> –11.6Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	363	284 ± 7
LiF(16.2)–51.5LiCl–16.2Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> –16.2Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	402	291
LiF(17.6–17.7)–(33.2–33.8) KF–(40.0–40.4) KCO <sub>3</sub> –(8.6–8.7) KCl <sup>a</sup>	422–426	407–412
LiF(20)–80LiOH	427	1163
LiF(25.0)–43.8LiVO <sub>3</sub> – 14.8Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> –16.5Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	428	260
LiF(80)–20LiOH	430	528
LiF(45.7)–1.8BaF <sub>2</sub> –41.2KF–11.3NaF	438	332
LiF(42.5–45.5)–(41.0–43.0) KF– (10.7–11.5) NaF–(2.8–3.0) KCl	440–448	682–692
LiF(27.1)–11.9NaF–55.1KF–5.9MgF <sub>2</sub> <sup>a</sup>	449	699
LiF(29.2)–11.7NaF–59.1KF <sup>a</sup>	454	414
LiF(46.5)–42KF–11.5–NaF	454	325
Li(29)–12NaF–59KF <sup>a</sup>	463	442
LiF(73.6)–26.4LiCl	485	403
KF(50)–50LiCl	487	344
LiF(33)–67KF <sup>a</sup>	493	458
LiF(18.0)–53.0LiVO <sub>3</sub> –29.0Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	493	297
NaF(20.1)–79.9ZrF <sub>4</sub> <sup>a</sup>	510	255
NaF(17)–21KCl–62K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	520	274
KF(23)–40KCl–37K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	528	283
LiF(36.1)–34NaF–18.5CaF <sub>2</sub> – 3.3BaF <sub>2</sub> –8.1BaMoO <sub>4</sub>	536	653
KF(40)–60KBr	576	315
LiF(25.67–25.76)–(36.45– 36.57)NaF–(27.0–27.25) CaF <sub>2</sub> –(10.63–10.67)MgF <sub>2</sub> <sup>a</sup>	593–595	510–515
KF(55)–45KCl	605	407
LiF(35.2)–38.3NaF–26.5CaF <sub>2</sub>	615	636
LiF(52)–35NaF–13CaF <sub>2</sub>	615	640
Li(46)–44NaF–10MgF <sub>2</sub>	632	858
NaF(27)–73NaBr	642	360
LiF(34.51–34.79)–(37.25–37.6)MgF <sub>2</sub> – (24.5–25.0)CaF <sub>2</sub> –(3.21–3.31)NaF	651–657	460–470
LiF(60)–40NaF	652	816
NaF(33.5)–66.5NaCl	675	572
LiF(62)–19NaF–19MgF <sub>2</sub>	693	690
LiF(70)–30MgF <sub>2</sub>	728	520
NaF(65)–23CaF <sub>2</sub> –12MgF <sub>2</sub>	743	568
LiF(67)–33MgF <sub>2</sub>	746	947
LiF(74)–13KF–13MgF <sub>2</sub>	749	860
LiF(80)–20CeF <sub>3</sub>	756	500
LiF(81.5)–19.5CaF <sub>2</sub>	769	820
KF(85)–15CaF <sub>2</sub>	780	440
KF(85)–15MgF <sub>2</sub>	790	520
NaF(64)–20MgF <sub>2</sub> –16KF	804	650
NaF(62.5)–22.5MgF <sub>2</sub> –15KF	809	543
NaF(68)–32CaF <sub>2</sub>	810	600
NaF(75)–25MgF <sub>2</sub>	832	627
CaF <sub>2</sub> (49)–41.4CaSO <sub>4</sub> –9.6CaMoO <sub>4</sub>	943	237

<sup>a</sup> wt.%.

Tabla 16: Composiciones de sal fluorada [80-102].

Generalizando las propiedades termofísicas de los PCM de alta temperatura. A continuación, consideraremos solo aquellas publicaciones que podrían encontrar una pregunta interesante para nosotros.

En 1977-1978, Marianovski y Maru con colegas del Instituto de Tecnología de Gas de Chicago publicaron los resultados de las investigaciones de varios aspectos de los sistemas de almacenamiento de calor de cambio de fase que operan por encima de 450°C. En particular, han generalizado los datos sobre propiedades termofísicas que se presentan en la **Tabla 20**.

Desafortunadamente, estos investigadores no han especificado las temperaturas a las que se realizaron las mediciones. Y, en consecuencia, los datos especificados en la **Tabla 20** se pueden considerar como datos aproximados.

Venkatesetti y LeFrois [103] de Honeywell, Inc. Estudio de materiales de almacenamiento térmico destinados

a unidades de almacenamiento en energía solar.

Salt composition (mol.%)	$T_m, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_f, \text{J/g}$
LiCl(28.5–28.9)–(43.5–44.5)CsCl– (13.7–14.1)KCl–(13.3–13.5)RbCl	256 ± 2.5	375–380
LiCl(59.15)–40.85Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	270	167
NaCl(7.8)–85.8NaOH–6.4NaCO <sub>3</sub>	282	316
NaCl(8)–5NaF–87NaNO <sub>3</sub>	288	224
LiCl(54.2)–6.4BaCl <sub>2</sub> –39.4KCl	320	170
LiCl(41.5,0)–16.4LiVO <sub>3</sub> –7.0LiF– 11.6Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> –35.1Li <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	340	177
LiCl(47.4–47.7)–(46.8–47.0)KCl– (3.2–3.4)LiCO <sub>3</sub> –(2.1–2.4)LiF <sup>a</sup>	340–343	375–380
LiCl(58)–42KCl	348	170
KCl(28.7)–45MnCl <sub>2</sub> –26.3NaCl	350	215
KCl(45.5)–34.5MnCl <sub>2</sub> –20NaCl	390	230
LiCl(23.4–24.2)–(24.8–25.3) LiVO <sub>3</sub> –(27.1–27.6)Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> – (17.3–17.8)Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> –(6.1–6.2)LiF <sup>a</sup>	360–363	278–284
LiCl(42.0)–17.4LiVO <sub>3</sub> –17.4LiF– 11.6Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> –11.6Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	363	284 ± 7
NaCl(22.5–26.5)–(18.5–22.5) KCl–(57.0–53.0) MgCl <sub>2</sub> <sup>a</sup>	385–393	405–410
KCl(21.6)–45.4MgCl <sub>2</sub> –33.0NaCl	385	284
KCl(20)–50MgCl <sub>2</sub> –30NaCl	396	291
KCl(22)–51MgCl <sub>2</sub> –27NaCl	396	290
KCl(37.7)–37.3MnCl <sub>2</sub> –25NaCl	400	235
LiCl(51.5)–16.2LiF– 16.2Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> –16.2Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	402	291
NaCl(56)–44MgCl <sub>2</sub>	430	320
KCl(54)–46ZnCl <sub>2</sub> <sup>a</sup>	432	218
KCl(61)–39MgCl <sub>2</sub> <sup>a</sup>	435	351
NaCl(56.2)–43.8MgCl <sub>2</sub>	442	325
LiCl(58.5)–23.6Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> –17.9Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	445	327
KCl(36)–64MnCl <sub>2</sub>	448	236
LiCl(49.0)–12.75Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> –38.25LiVO <sub>3</sub>	449	450
KCl(35)–65MnCl <sub>2</sub>	450	237
NaCl(60)–40MgCl <sub>2</sub>	450	328
NaCl(48)–52MgCl <sub>2</sub> <sup>a</sup>	450	430
CaCl <sub>2</sub> (47.6)–8.1KCl– 41.3NaCl–2.9NaF	460	231
CaCl <sub>2</sub> (41.6)–2.2KCl– 8.8MgCl <sub>2</sub> –47.4NaCl	460	245
CaCl <sub>2</sub> (50)–7.25KCl–42.75NaCl	465	245
KCl(36)–64MgCl <sub>2</sub> <sup>a</sup>	470	388
BaCl <sub>2</sub> (8.7)–52.3KCl– 18.2MgCl <sub>2</sub> –20.7NaCl	475	248
BaCl <sub>2</sub> (13.1)–16.9CaCl <sub>2</sub> – 47.3KCl–22.7NaCl	478	208
BaCl <sub>2</sub> (9.3)–22.2CaCl <sub>2</sub> – 42.7KCl–25.8NaCl	479	217
LiCl(69.5)–26.5LiF–4MgF <sub>2</sub>	484	157
CaCl <sub>2</sub> (50)–1.5CaF <sub>2</sub> –48.5NaF	490	264
CaCl <sub>2</sub> (52.3–55)–(45–47.2) NaCl	490–500	233–239
CaCl <sub>2</sub> (52.8)–47.2NaCl	500	239
NaCl(33)–67 CaCl <sub>2</sub> <sup>a</sup>	500	281
MgCl <sub>2</sub> (37)–63 SrCl <sub>2</sub> <sup>a</sup>	535	239
KCl(25)–27 CaCl <sub>2</sub> –48 MgCl <sub>2</sub> <sup>a</sup>	487	342
CaCl <sub>2</sub> (66)–5KCl–29NaCl <sup>a</sup>	504	279
SrCl <sub>2</sub> (68)–13KCl–19NaCl <sup>a</sup>	504	223
KCl(21)–17NaF–62K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	520	274
NaCl(5)–40NaBr–55Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	524	215
KCl(40)–23KF–37K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	528	283
KCl(28)–19NaCl–53BaCl <sub>2</sub> <sup>a</sup>	542	221
KCl(24)–47BaCl <sub>2</sub> –29CaCl <sub>2</sub> <sup>a</sup>	551	219
NaCl(952)–48NiCl <sub>2</sub>	573	558
LiCl(94.5)–5.5MgF <sub>2</sub>	573	131
KCl(45)–55KF	605	407
NaCl(38.5)–23NaBr–38.5Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	612	168
CaCl(38.5)–11CaSO <sub>4</sub> –4CaMoO <sub>4</sub>	673	224

<sup>a</sup> wt.%.

Tabla 17: Composiciones eutécticas de cloruros [80-83,85,87,92,93,95,104-113].

Las centrales térmicas han encontrado en la literatura nueve composiciones eutécticas inorgánicas con puntos de fusión entre 220 y 290°C. Las propiedades termofísicas de nueve mezclas de sales, medidas por estos autores utilizando un método de calorimetría de barrido diferencial, se presentan en la **Tabla 20**. La capacidad era

Salt composition (mol.%)	$T_m, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_f, \text{J/g}$
<b>Hydroxides</b>		
NaOH(50)–50KOH	169–171	202–213
LiOH(30)–70NaOH	210–216	278–329
NaOH(20)–80NaNO <sub>2</sub>	230–232	206–252
NaOH(73)–27NaNO <sub>2</sub>	237–238	249–295
NaOH(78.1)–3.6NaCl–18.3NaNO <sub>3</sub>	242	242
NaOH(28)–72NaNO <sub>3</sub>	246–247	182–257
NaOH(55.6)–4.2NaCl–40.2NaNO <sub>3</sub>	247	213
LiOH(63)–37LiCl	264	437
NaOH(59)–41NaNO <sub>3</sub>	266	278
LiOH(65.5)–34.5LiCl	274	339
LiOH(62)–36.5LiCl–1.5KCl	282	300
NaOH(81.5)–18.5NaNO <sub>3</sub>	256–258	251–292
NaOH(59)–41NaNO <sub>3</sub>	266	221
NaOH(85.8)–7.8NaCl–6.4Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	282	316
NaOH(88.3)–5.3NaCl–6.4Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	282	279
NaOH(87.3)–6.1NaCl–6.6Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	291	283
NaOH(85.8)–7.8NaCl–6.4Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	298	286
NaOH(77.2)–16.2NaCl–6.6Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	318	290
LiOH(80)–20LiF	427	1163
<b>Nitrates</b>		
LiNO <sub>3</sub> (29)–17NaNO <sub>3</sub> – 49.4KNO <sub>3</sub> –4.6Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>a</sup>	105	110
LiNO <sub>3</sub> (33)–67KNO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	133	170
LiNO <sub>3</sub> (31.7)–68.3KNO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	135	136
KNO <sub>3</sub> (53)–40NaNO <sub>2</sub> –7NaNO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	142	80
LiNO <sub>3</sub> (55.4)–4.5NaNO <sub>3</sub> –40.1KCl <sup>a</sup>	160	266
LiNO <sub>3</sub> (58.1)–41.9KCl <sup>a</sup>	166	272
LiNO <sub>3</sub> (47.9)–1.4LiCl–50.7NaNO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	180	265
LiNO <sub>3</sub> (57)–43NaNO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	193	248
LiNO <sub>3</sub> (49)–51NaNO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	194	265
LiNO <sub>3</sub> (45)–47NaNO <sub>3</sub> –8Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>a</sup>	200	199
LiNO <sub>3</sub> (87)–13NaCl <sup>a</sup>	208	369
KNO <sub>3</sub> (54)–46NaNO <sub>3</sub> <sup>a</sup>	222	100
NaNO <sub>3</sub> (54)–46KNO <sub>3</sub>	222	117
NaNO <sub>3</sub> (18.3)–3.6NaCl–78.1NaOH	242	242
NaNO <sub>3</sub> (40.2)–4.2NaCl–55.6NaOH	247	213
NaNO <sub>3</sub> (70)–30NaOH	247	158
LiNO <sub>3</sub> (97.4)–2.6Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	253	368
LiNO <sub>3</sub> (93.6)–6.4NaCl <sup>a</sup>	255	354
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (40.85)–59.15LiCl	270	167
NaNO <sub>3</sub> (86.3)–8.4NaCl–5.3Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	287	177

<sup>a</sup> wt.%.

Tabla 18: Composiciones de hidróxidos y nitratos [83,87,103,106,114,115,116].

Salt composition (wt.%)	$T_m, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_f, \text{J/g}$
$\text{Na}_2\text{CO}_3(6.4)\text{--}85.8\text{NaOH--}7.8\text{NaCl}$	282	316
$\text{Li}_2\text{CO}_3(32.1)\text{--}34.5\text{K}_2\text{CO}_3\text{--}33.4\text{Na}_2\text{CO}_3$	397	276
$\text{Li}_2\text{CO}_3(47)\text{--}53\text{K}_2\text{CO}_3$	488	342
$\text{Li}_2\text{CO}_3(47)\text{--}53\text{K}_2\text{CO}_3$	491	321
$\text{Li}_2\text{CO}_3(46.6)\text{--}53.4\text{K}_2\text{CO}_3$	488	391
$\text{Li}_2\text{CO}_3(44)\text{--}56\text{Na}_2\text{CO}_3$	496	370
$\text{Li}_2\text{CO}_3(28)\text{--}72\text{K}_2\text{CO}_3$	498	263
$\text{Li}_2\text{CO}_3(28.5)\text{--}71.5\text{K}_2\text{CO}_3$	498	316
$\text{Li}_2\text{CO}_3(44.3)\text{--}55.7\text{Na}_2\text{CO}_3$	498	393
$\text{Li}_2\text{CO}_3(35)\text{--}65\text{K}_2\text{CO}_3$	505	344
$\text{Li}_2\text{CO}_3(32)\text{--}35\text{K}_2\text{CO}_3\text{--}33\text{Na}_2\text{CO}_3$	397	276
$\text{K}_2\text{CO}_3(62)\text{--}17\text{NaF--}21\text{KCl}$	520	274
$\text{K}_2\text{CO}_3(37)\text{--}40\text{KCl--}23\text{KF}$	528	283
$\text{Li}_2\text{CO}_3(20)\text{--}60\text{Na}_2\text{CO}_3\text{--}20\text{K}_2\text{CO}_3$	550	283
$\text{Li}_2\text{CO}_3(22)\text{--}16\text{Na}_2\text{CO}_3\text{--}62\text{K}_2\text{CO}_3$	550	288
$\text{K}_2\text{CO}_3(47.8)\text{--}52.2\text{K}_2\text{CO}_3$	710	176
$\text{K}_2\text{CO}_3(50)\text{--}50\text{Na}_2\text{CO}_3$	710	163
$\text{K}_2\text{CO}_3(51)\text{--}49\text{Na}_2\text{CO}_3$	710	163
$\text{NaBr}(43)\text{--}2\text{NaF--}55\text{Na}_2\text{MoO}_4^a$	506	241
$\text{Li}_2\text{SO}_4(59.8)\text{--}36.7\text{Li}_2\text{MoO}_4\text{--}3.5\text{CaMoO}_4^a$	538	406
$\text{KBr}(60)\text{--}40\text{KF}^a$	576	315
$\text{KBr}(65)\text{--}35\text{K}_2\text{MoO}_4^a$	625	90.5
$\text{Li}_2\text{SO}_4(82)\text{--}11.44\text{CaSO}_4\text{--}6.56\text{CaMoO}_4^a$	680	207

<sup>a</sup> mol.%.

**Tabla 19:** Composiciones salinas a base de carbonatos y algunas otras sales [85,90,92,93,95,117-119].

medido en el área que cubre 25°C por debajo del punto de fusión y 25°C por encima del punto de fusión. Los datos especificados en la **Tabla 21** sobre la capacidad térmica son los valores promedio encontrados para los estados sólido y líquido.

Algunas propiedades térmicas de las composiciones de sal, que Birchenall y Riechman [120] encontraron en la literatura, se resumen en la **Tabla 21**.

El investigador japonés Kamimoto [121] del Laboratorio Electrotécnico en Ibaraki usó un tipo de calorímetro de gota para determinar el calor de fusión de sales tales como  $\text{LiNO}_3$  y  $\text{NaNO}_2$ . El calorímetro fue calibrado preliminarmente con zafiro. El calor de fusión del nitrato de litio es igual a 357 J / g, y nitrato de sodio, 222 J / g. Según el autor, el error de medición no supera el 1,5%.

Takahashi et al. [116] investigaron las propiedades de los hidróxidos de litio, sodio y potasio. Las mediciones se han realizado en un calorímetro de barrido diferencial de alta precisión Perkin-Elmer DSC-2. El calor de fusión se ha determinado utilizando un método sugerido por Takahashi [122]. En vista de la actividad de corrosión y humectabilidad de los hidróxidos, fue imposible utilizar recipientes de aluminio, platino o cuarzo. El politetrafluoroetileno (teflón) se utiliza como un recipiente. Las nuevas muestras de teflón han demostrado su idoneidad para medir el calor de fusión y las capacidades térmicas de las sales. El error de las mediciones con dichos contenedores fue inferior al 2%. Debido a las transformaciones de fase y la fusión de teflón (cerca de 290, 300 y 600 K respectivamente), los estudios termoanalíticos se limitaron a un intervalo de temperaturas de 323 a 573 K. La capacidad térmica del hidróxido de sodio se describió mediante la siguiente ecuación de regresión:

$$C_{ps} \left( \frac{\text{J}}{\text{gK}} \right) = 1,028 + 1,443 * 10^{-3} T(K) \quad \text{para } 330 - 505K$$

Para la mezcla eutéctica equimolar de NaOH y KOH (50:50% en moles), los resultados de las mediciones de la capacidad térmica se describen mediante las siguientes ecuaciones de regresión:

$$C_{ps} \left( \frac{\text{J}}{\text{gK}} \right) = 0,905 + 1,124 * 10^{-3} T(K) \quad \text{para } 330 - 360K$$

$$C_{ps} \left( \frac{\text{J}}{\text{gK}} \right) = 0,435 + 2,451 * 10^{-3} T(K) \quad \text{para } 365 - 430K$$

$$C_{ps} \left( \frac{\text{J}}{\text{gK}} \right) = 1,800 + 0,023 * 10^{-3} T(K) \quad \text{para } 470 - 575K$$

El punto de fusión de la mezcla se encuentra en el rango de 169-171°C, el calor de fusión es igual a 202-213 J /



g. Los valores más bajos de los valores especificados corresponden a los datos recibidos de las curvas de calentamiento y los valores más altos de las curvas de enfriamiento.

Para composiciones eutécticas de LiOH y NaOH (30:70% en moles), se han ofrecido las siguientes ecuaciones:

$$C_{ps} \left( \frac{J}{gK} \right) = 0,772 + 2,81 \cdot 10^{-3} T(K) \text{ para } 330 - 450K$$

$$C_{pl} \left( \frac{J}{gK} \right) = 2,020 + 1,54 \cdot 10^{-3} T(K) \text{ para } 510 - 575K$$

La temperatura de fusión de la composición se encontró que era igual a 215-216°C y el calor de fusión estaba dentro de 278-290 J / g. La composición experimenta una transformación de fase a 173-187°C, con un efecto térmico de 54-58 J / g.

En 1988, Takahashi et al. [123] se habían publicado sobre la base de medidas de capacidad térmica y calor de fusión de nitratos de litio, sodio y potasio y algunos compuestos y mezclas en base a ellos. El valor encontrado del calor de fusión para el nitrato de litio fue 363, para el nitrato de sodio 173, y para el nitrato de potasio 96.6 J / g. La transformación de calor de fase en estado sólido para nitrato de sodio es igual a 45, y para nitrato de potasio 50.6 J / g. Los valores medidos de temperaturas de fusión y temperaturas de solidificación, así como el calor de fusión, se presentan en la **Tabla 22**.

Es fácil notar que para algunos compuestos y composiciones se registran variaciones significativas en las temperaturas de fusión y las temperaturas de solidificación. Las razones de tal variación no están establecidas. Las mediciones de la capacidad térmica han dado los siguientes resultados:

Composition, wt.%	$T_m$ , °C	$\Delta H_f$ , J/g	$C_p$ , J/gK		$\lambda$ , W/mK	$\rho$ , at 25 °C, g/cm <sup>3</sup>	Safety (d)	Compatibility	Price, US\$/kg
			Solid	Liquid					
KCl(54)-46ZnCl <sub>2</sub>	432	218	0.67	0.88	0.83	2.41	2e	SS	0.59
KCl(61)-39MgCl <sub>2</sub>	435	351	0.80	0.96	0.81	2.11	2e	SS	0.13
NaCl(48)-52MgCl <sub>2</sub>	450	430	0.92	1.00	0.95	2.23	2	SS	0.18
KCl(36)-64MgCl <sub>2</sub>	470	388	0.84	0.96	0.83	2.19	2e	SS	0.20
NaCl(33)-67CaCl <sub>2</sub>	500	281	0.84	1.00	1.02	2.16	1	SS	0.07
MgCl <sub>2</sub> (37)-63SrCl <sub>2</sub>	535	239	0.67	0.80	1.05	2.78	2	SS	0.73
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (47)-53K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	488	342	1.03	1.34	1.99	2.20	2	SS	1.04
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (44)-556Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	496	370	1.80	2.09	2.09	2.32	2	SS	0.77
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (28)-72K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	498	263	1.46	1.80	1.85	2.24	2	SS	0.79
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (51)-49Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	710	163	1.67	1.56	1.73	2.40	2	SS	0.24
LiF(33)-67KF	442	618	1.34	1.63	3.98	2.53	3e	316 SS	2.67
NaF(67)-33MgF <sub>2</sub>	832	616	1.42	1.38	4.65	2.14	3e	316 SS	1.26
NaBr(45)-55MgBr <sub>2</sub>	431	212	0.50	0.59	0.90	3.49	2e	316 SS	3.57
LiF(20)-80LiOH	426	869	0.88	1.00		1.60	3	300 SS	4.54
KCl(25)-27CaCl <sub>2</sub> -48MgCl <sub>2</sub>	487	342	0.80	0.92	0.88	2.53	2e	SS	0.18
KCl(5)-29NaCl-66CaCl <sub>2</sub>	504	279	1.17	1.00	1.00	2.15	2e	SS	0.07
KCl(13)-19NaCl-68SrCl <sub>2</sub>	504	223	0.67	0.84	1.05	2.75	2e	SS	3.02
KCl(28)-19NaCl-53BaCl <sub>2</sub>	542	221	0.63	0.80	0.86	3.02	2e	SS	0.20
KCl(24)-47BaCl <sub>2</sub> -29CaCl <sub>2</sub>	551	219	0.67	0.84	0.95	2.93	2e	SS	0.20
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (32)-35K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	397	276	1.67	1.63	2.02	2.30	2	SS	0.73
NaF(12)-59KF-29LiF	454	590	1.34	1.55	4.50	2.53	3e	316 SS	2.45
KCl(40)-23KF-37K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	528	283	1.00	1.26	1.19	2.28	3e	SS	0.51
NaF(17)-21KF-62K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	520	274	1.17	1.38	1.50	2.38	3e	SS	0.40
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (35)-65K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	505	344	1.34	1.76	1.89	2.26	2	SS	0.88
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (20)-60Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -20K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	550	283	1.59	1.88	1.83	2.38	2	SS	0.46
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (22)-16Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -62K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	580	288	1.80	2.09	1.95	2.34	2	0.66	

d, toxic hazard rating code; 2, moderate; 3, high; e, when strongly heated, they emit high toxic fumes; SS, stainless steel.

**Tabla 20: Propiedades termofísicas de algunas composiciones de sal extraídas [92,93].**

Composition, wt.%	$T_m$ , °C	$\Delta H_f$ , J/g	$\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	$C_p$ , J/gK	$\lambda$ , W/mK
NaF(75)-25MgF <sub>2</sub>	832	650	2.68	1.42	4.66
LiF(67)-33MgF <sub>2</sub>	746	947	2.63	1.42	
NaF(65)-23CaF <sub>2</sub> -12MgF <sub>2</sub>	745	574	1.58	1.17	
LiF(33.4)-49.9NaF <sub>2</sub> -17.1MgF <sub>2</sub>	650	860	2.82	1.42	1.15
LiF(46)-44NaF <sub>2</sub> -10MgF <sub>2</sub>	632	858	2.24	1.40	1.20
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (56)-44Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	496	368	2.33	1.85	2.11
NaCl(50)-50MgCl <sub>2</sub>	450	429	2.24	0.93	0.96
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (31)-35K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	397	275	2.31	1.69	2.04
MgCl <sub>2</sub> (63)-22.3NaCl-14KCl	385	461	2.25	0.96	0.95
NaCl(7.8)-6.4Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -85.5NaOH	282	316	2.13	2.51	
LiCl(37)-63LiOH	262	485	1.55	2.40	1.10

**Tabla 21: Propiedades termofísicas de algunas composiciones de sales [120].**

Salt composition, mol.%	$T_{fus}, ^\circ C$	$T_{sol}, ^\circ C$	$\Delta H_f, J/g$
$NaNO_3 - NaOH$	271	213	265
$NaNO_3 - 2NaOH$	270	218	295
$NaNO_3(72) - 28NaOH$	247	213	237
$NaNO_3(41) - 59NaOH$	266	221	278
$NaNO_3(18.5) - 81.5NaOH$	257	254	292
$NaNO_2 - NaOH$	265	228	313
$NaNO_2(80) - 20NaOH$	232	232	252
$NaNO_2(27) - 73NaOH$	237	227	294

**Tabla 22: Temperaturas de fusión, temperaturas de solidificación y calores de fusión de algunos compuestos y composiciones a base de nitratos y nitritos [123].**

Nitrato de litio

$$C_{ps} \left( \frac{J}{gK} \right) = 0,585 + 2,182 * 10^{-3} T(K) \quad \text{para } 334 - 493K$$

$$C_{pl} \left( \frac{J}{gK} \right) = 1,681 + 6,389 * 10^{-4} T(K) \quad \text{para } 540 - 653K$$

Nitrato de sodio

$$C_{ps} \left( \frac{J}{gK} \right) = 3,15 - 1,186 * 10^{-2} T(K) + 1,807 * 10^{-5} \left( \frac{T}{K} \right)^2 \quad \text{para } 334 - 493K$$

$$C_{pl} \left( \frac{J}{gK} \right) = 1,676 + 1,282 * 10^{-5} (T/K) \quad \text{para } 586 - 653K$$

Nitrato de potasio

$$C_{ps} \left( \frac{J}{gK} \right) = 0,326 - 1,91 * 10^{-3} (T/K) \quad \text{para } 334 - 400K$$

$$C_{ps} \left( \frac{J}{gK} \right) = 2,442 - 5,682 * 10^{-3} T(K) + 6,628 * 10^{-6} \left( \frac{T}{K} \right)^2 \quad \text{para } 423 - 600K$$

$$C_{pl} \left( \frac{J}{gK} \right) = 1,417 - 4,678 * 10^{-5} (T/K) \quad \text{para } 620 - 733K$$

Además de la capacidad térmica de nitratos mencionada anteriormente, se han determinado las siguientes composiciones de sales bastante dispersas:

**$NaNO_2 - NaOH$  (27 – 73 mol. %)**

$$C_{ps} \left( \frac{J}{gK} \right) = 1,123 + 1,184 * 10^{-3} T(K) - 7112,8 \left( \frac{T}{K} \right)^{-2} \quad \text{para } 334 - 493K$$

$$C_{pl} \left( \frac{J}{gK} \right) = 2,067 \quad \text{para } 534 - 573K$$

**$NaNO_2 - NaOH$  (50 – 50 mol. %)**

$$C_{ps} \left( \frac{J}{gK} \right) = 1,562 + 4,153 * 10^{-4} T(K) - 32.489 \left( \frac{T}{K} \right)^{-2} \quad \text{para } 334 - 493K$$

$$C_{pl} \left( \frac{J}{gK} \right) = 1,962 \quad \text{para } 534 - 573K$$

**$NaNO_2 - NaOH$  (80 – 20 mol. %)**

$$C_{ps} \left( \frac{J}{gK} \right) = -5796 + 1444 * 10^{-2} T(K) - 257.490 \left( \frac{T}{K} \right)^{-2} \quad \text{para } 334 - 413K$$

$$C_{ps} \left( \frac{J}{gK} \right) = -31.503 + 4729 * 10^{-2} T(K) - 2.438.500 \left( \frac{T}{K} \right)^{-2} \quad \text{para } 453 - 503K$$

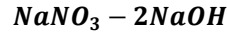
$$C_{pl} \left( \frac{J}{gK} \right) = 1795 \quad \text{para } 534 - 573K$$

**$NaNO_3 - NaOH$  (18,5 – 81,5 mol. %)**

$$C_{ps} \left( \frac{J}{gK} \right) = -0,200 + 3,277 * 10^{-3} T(K) - 55.743 \left( \frac{T}{K} \right)^{-2} \quad \text{para } 334 - 523K$$

$$C_{pl} \left( \frac{J}{gK} \right) = 2,054 \quad \text{para } 534 - 573K$$





$$c_{ps} \left( \frac{J}{gK} \right) = -0,330 + 2258 * 10^{-3} T(K) \text{ para } 334 - 513K$$

Los resultados de las investigaciones experimentales de las propiedades termodinámicas de algunas sales puras y composiciones sobre su base se han considerado anteriormente. Además de las propiedades mencionadas anteriormente y otras propiedades termofísicas, debemos poseer los datos sobre conductividad térmica y difusividad tanto en estado sólido como líquido. A continuación consideraremos los resultados de algunos estudios experimentales de estas propiedades.

Tufen et al. [124] investigaron la conducción de calor de algunas sales y mezclas fundidas. Las medidas gastadas han dado los siguientes resultados:

Nitrato de litio

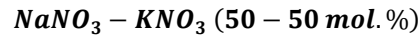
$$\lambda_1(W/mK) = 0,506 - 0,516 \text{ para } 320 - 400^\circ C$$

Nitrato de potasio

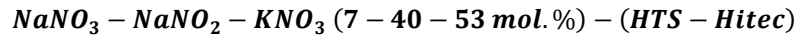
$$\lambda_1(W/mK) = 0,416 - 0,423 \text{ para } 343 - 427^\circ C$$

Nitrato de sodio

$$\lambda_1(W/mK) = 0,416 - 0,423 \text{ para } 343 - 427^\circ C$$



$$\lambda_1(W/mK) = 0,458 - 0,460 \text{ para } 251 - 398^\circ C$$



$$\lambda_1(W/mK) = 0,458 - 0,460 \text{ para } 251 - 398^\circ C$$

El error de medición de la conductividad térmica se estima en un 4%.

Salt	$\lambda_m$	$b$	$T_m$	Temperature range, K
LiCl	0.626	$-2.9 \times 10^{-4}$	883	967-1321
NaCl	0.519	$-1.8 \times 10^{-4}$	1074	1170-1441
KCl	0.389	$-1.7 \times 10^{-4}$	1043	1056-1335
RbCl	0.249	$-1.1 \times 10^{-4}$	990	1046-1441
CsCl	0.209	$-1.2 \times 10^{-4}$	918	960-1360
NaBr	0.320	$-0.8 \times 10^{-4}$	1020	1050-1267
KBr	0.218	$-0.4 \times 10^{-4}$	1007	1035-1245
RbBr	0.203	$-1.1 \times 10^{-4}$	953	1031-1326
CsBr	0.149	$-0.2 \times 10^{-4}$	909	948-1314

**Tabla 23:** Valores opcionales de los coeficientes en la ecuación (1), para la determinación de la conductividad térmica de los cloruros y bromuros de metales alcalinos [125,126].

Nagasaka et al. [125] utilizó un método de dispersión forzada de Rayleigh para medir la difusividad térmica de cloruros de metales alcalinos en estado líquido. Basándose en los valores medidos y utilizando datos literarios, los autores han determinado la conductividad térmica. El procesamiento de los valores calculados de conductividad térmica mediante el método de mínimos cuadrados ha dado una dependencia de la temperatura de regresión lineal de una clase:

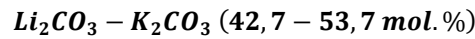
$$\lambda_1(W/mK) = \lambda_m + b(T - T_m) \quad (1)$$

Los factores en las ecuaciones de regresión se dan en la **Tabla 23**. Para el KCl-5% para RbCl-6% y para CsCl-9, para LiCl-11%, para NaCl-4%, para KCl-5% %. Lo más probable es que la determinación de la conductividad térmica no sea menor que para la difusividad térmica.

En el siguiente trabajo Nakazawa et al. [126] utilizó el método descrito anteriormente [125] para determinar la difusividad térmica y la conductividad térmica de los solventes de los bromuros de metales alcalinos. La **Tabla 23** ilustra los factores en las ecuaciones de regresión (1) para la conductividad del calor.

El error de determinación de la difusividad térmica se estima en 7% para NaBr, 3% para KBr, 7% para RbBr y 11% para CsBr.

Araki et al. [127] han llevado a cabo una investigación compleja de las propiedades termofísicas de las masas fundidas de algunas composiciones sobre la base de carbonatos de metales alcalinos. La densidad, la capacidad térmica y la difusividad térmica se miden experimentalmente. Como muestras, se seleccionaron  $Li_2CO_3 - K_2CO_3$  (42.7 – 57.3% en moles),  $Li_2CO_3 - K_2CO_3$  (50 – 50% en moles) y  $Li_2CO_3 - K_2CO_3$  (62.0 – 38.0% en moles). Las mezclas primera y tercera representan composiciones eutécticas cuyas temperaturas de fusión son iguales a 498 y 488°C respectivamente. La segunda mezcla no es esa otra, ya que el compuesto  $LiKCO_3$ , que se funde a 505°C. Todas estas composiciones son bastante estables a temperaturas elevadas. Como resultado de las mediciones se ofrecen las siguientes correlaciones de regresión:



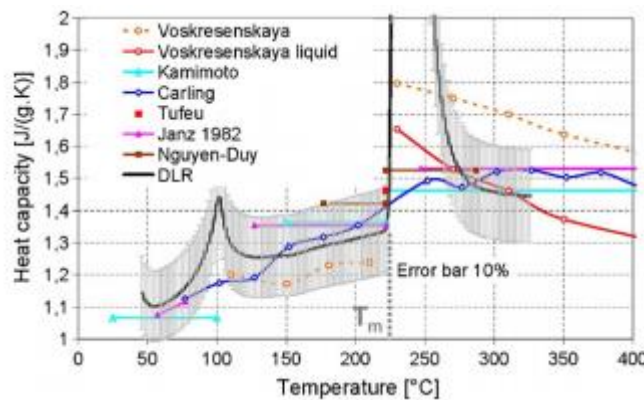
$$\alpha \left( m^2/s \right) = 1,93 * 10^{-7} + 4,85 * 10^{-10}(T - 771) \quad \text{para } 807 - 960K$$

$$C_{ps} \left( J/g \right) = 0,592 + 1,16 * 10^{-3}T \quad 341 - 634K$$

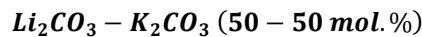
$$C_{pl} \left( J/g \right) = 1,49 \quad \text{para } 781 - 1071K$$

$$\rho_1 \left( g/sm^3 \right) = 2,028 - 0,465(T - 771) \quad \text{para } 819 - 1065K$$

$$\lambda_1 \left( W/mK \right) = 0,587 + 1,26(T - 771) \quad \text{para } 807 - 960K$$



**Figura 20:** Capacidad calorífica de la composición eutéctica  $KNO_3 - NaNO_3$  obtenida utilizando una técnica de calorímetro de barrido diferencial [128].



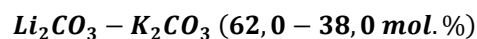
$$\alpha \left( m^2/s \right) = 1,97 * 10^{-7} + 4,17 * 10^{-10}(T - 778) \quad \text{para } 805 - 960K$$

$$C_{ps} \left( J/g \right) = 0,618 + 1,03 * 10^{-3}T \quad 352 - 626K$$

$$C_{pl} \left( J/g \right) = 1,55 \quad \text{para } 800 - 1060K$$

$$\rho_1 \left( g/sm^3 \right) = 2,011 - 0,465(T - 778) \quad \text{para } 800 - 1083K$$

$$\lambda_1 \left( W/mK \right) = 0,617 + 1,10 * 10^{-3}(T - 778) \quad \text{para } 805 - 973K$$



$$\alpha \left( m^2/s \right) = 1,92 * 10^{-7} + 3,56 * 10^{-10} (T - 761) \quad \text{para } 770 - 979K$$

$$C_{ps} \left( J/g \right) = 0,562 + 1,16 * 10^{-3} T \quad 770 - 979K$$

$$C_{pl} \left( J/g \right) = 1,60 \quad \text{para } 773 - 1071K$$

$$\rho_1 \left( g/sm^3 \right) = 1,991 - 0,434 (T - 761) \quad \text{para } 783 - 1082K$$

$$\lambda_1 \left( W/mK \right) = 0,618 + 0,95 * 10^{-3} (T - 761) \quad \text{para } 770 - 979K$$

En 2006, Bauer et al. [129] han presentado en la conferencia Ecstock 2006 los resultados de mediciones de algunas propiedades termofísicas del nitrato de sodio y composiciones eutécticas equimolares de  $KNO_3 - NaNO_3$ . **Figura 20** muestra la comparación de la capacidad térmica de la composición, medida en un calorímetro de barrido diferencial por Bauer et al., Y los resultados obtenidos por otros autores.

Dentro de un error de medición, todos los datos coinciden entre sí. La dependencia de la temperatura de la difusividad térmica determinada por el método de flash láser se muestra en la **Figura 21**. Para comparación, los datos de otros autores se presentan en la misma figura. La mayor divergencia se observa para los datos en fase sólida a bajas temperaturas.

La mayor parte de los valores medidos de difusividad térmica en la vecindad del punto de fusión está en el consentimiento satisfactorio de cada uno.

La **Figura 22** ilustra la dependencia de la temperatura de la conducción de calor obtenida para algunos nitratos y sus composiciones por diferentes investigadores. Como se ve en la **Figura 22**, conductividad de calor puro.

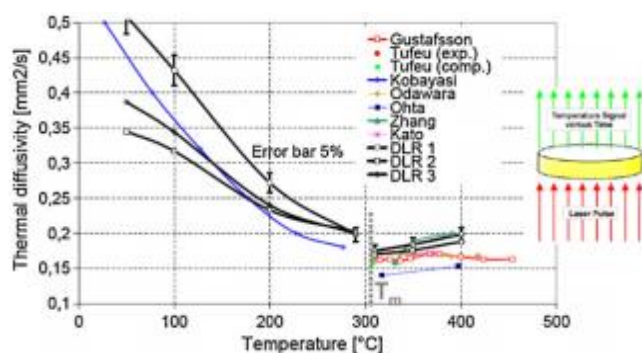


Figura 21: La dependencia de la temperatura de la difusividad térmica del nitrato de sodio [128].

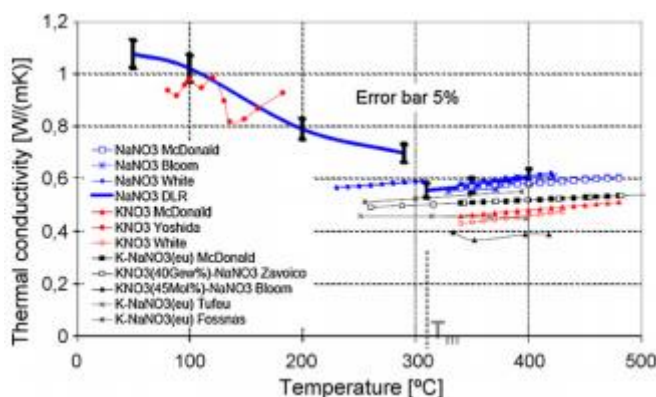


Figura 22: La dependencia de la temperatura de la conductividad térmica de algunos nitratos y sus composiciones [128].

Los nitratos de sodio y potasio, así como sus mezclas, están cerca uno del otro.

### 4.13 Resumen

A continuación se presenta un resumen de este apartado, donde veremos una tabla con las propiedades de cada una de las sales de cloruros estudiadas en este apartado (punto 4 estado del arte), junto con algunos comentarios de sus limitaciones y si hay alguna de estas sales que se esté utilizando hoy en día en alguna planta o que en el futuro se plantee su uso.

Hay que tener en consideración que para cada una de las sales y de las diferentes mezclas binarias y ternarias de estas sales, se ha tomado para el cálculo de sus propiedades las temperaturas medias para cada uno de sus rangos de operación.

	Sal fundida					Sal fundida binaria		Sal fundida ternaria	
	$AlCl_3$	$ZnCl_2$	$FeCl_3$	$NaCl$	$KCl$	$NaCl + AlCl_3$	$KCl + AlCl_3$	$NaCl + KCl + AlCl_3$	$NaCl + KCl + ZnCl_3$
<b>Densidad (<math>kg/m^3</math>)</b>	1180	2420	N/A	1500	1480	1550	1390	1670	2430
<b>Viscosidad (<math>Pa \cdot s</math>)*<math>10^{-3}</math></b>	0,22	88,23	N/A	0,90	0,87	0,20	N/A	N/A	43,52
<b>Conductividad térmica (<math>W/m \cdot K</math>)</b>	N/A	N/A	N/A	1,01	0,96	N/A	N/A	N/A	N/A
<b>Capacidad calorífica (<math>J/kg \cdot K</math>)</b>	941,2	739,54	825,43	505,92	987,24	N/A	N/A	N/A	N/A
<b>Presión (KPa)</b>	553,92	10,13	911,93	4,89	5,49	2,88	3,01	N/A	N/A
<b>Punto de fusión (<math>^{\circ}C</math>)</b>	192	283	282	802	770	127	128	88,9	203

**Tabla 24: Resumen de propiedades térmicas de las sales de cloruro y mezclas.**

-El cloruro de aluminio ( $AlCl_3$ ) dispone de muy buena viscosidad (bajo valor), pero trabaja con elevadas presiones de vapor por lo tanto no es útil como fluido de transferencia pero su mezcla con otras sales, si podría ser útil.

-El cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ ) tiene bajo punto de fusión y trabaja a bajas presiones de vapor por lo general, pero la viscosidad a bajas temperaturas se eleva bastante. Recomendable su uso en mezclas.

-El cloruro de sodio ( $NaCl$ ) tiene un coste relativamente bajo debido a su gran abundancia, tiene baja viscosidad y trabaja con presiones de vapor bajas.

-El cloruro de potasio ( $KCl$ ) tiene viscosidad baja y lo hace recomendable para mezclas eutécticas.

-La mezcla de  $NaCl + AlCl_3$  tiene un punto de fusión bajo y en general dispone de bajas viscosidades.

-La mezcla de  $KCl + AlCl_3$  tiene un punto de fusión relativamente bajo.

-El sistema ternario  $NaCl + KCl + AlCl_3$  tiene dos combinaciones en las cuales dispone de un punto de fusión bajo, aunque no se dispone de información de las presiones de vapor en las que trabaja, pero como el  $AlCl_3$  trabaja con altas presiones de vapor, el uso de esta mezcla puede ser problemática (no se recomienda como fluido HTF).

-El sistema ternario  $NaCl + KCl + ZnCl_2$  tiene tres combinaciones en las cuales pueden tener temperaturas de fusión por debajo de los  $250^\circ\text{C}$ . Gracias al  $ZnCl_2$ , puede trabajar con presiones de vapor muy bajas y por lo tanto resulta muy prometedora como fluido HTF.

Ninguna de estas sales se esta utilizando en plantas solares todavia, pero en vista de los resultados obtenidos de estos estudios parecen ser muy prometedoras, principalmente las mezclas ternarias y dentro de estas mezclas, las mezclas que trabajan con cloruro de zinc debido a las grandes ventajas que proporciona su uso en mezclas con otras sales.

Parece ser que el departamento de energía de los Estados Unidos, ha apoyado el desarrollo y estudio de este tipo de sales en la Iniciativa Sunshot, pero todavía no hay detalles, se desconoce si se ha llegado a algun tipo de utilización.

## 5 CONCLUSIONES

Durante años el avance de los países desarrollados se ha basado en el consumo masivo de combustibles fósiles, pero los graves efectos mediambientales y climáticos debido a este uso, hace que nazca una gran preocupación por el medioambiente. Esta mejora de las condiciones mediambientales se orienta en la búsqueda de mejoras en los sistemas haciendolos mas eficientes e implantación de tecnologías energeticas que hagan uso de fuentes de energías renovables.

Dentro de este sistema energético existente, se caracteriza porque la mayor parte de este consumo final de energía tiene lugar en forma de calor y trabajo, en muchos casos a través de electricidad como forma energética de alta calidad exergética y gran comodidad de transporte. Esto, junto con la importancia de la energía solar como fuente de energía renovable, hace que las centrales termosolares adquieran una gran relevancia de cara a asegurar las necesidades energéticas de una sociedad respetuosa con el medio ambiente.

Estas centrales energéticas termosolares, (CETs) no generan electricidad directamente a partir de la radiación solar, sino que transforma esta radiación en energía térmica que es aportada a un ciclo de potencia convencional y este transforma esa energía térmica en energía mecánica. Posteriormente, mediante un generador eléctrico se transforma la energía mecánica en energía eléctrica, siendo ésta última la que se inyecta a la red eléctrica y llega a los puntos de consumo.

De manera que a grandes rasgos el esquema de funcionamiento de una central termosolar sería la siguiente: Un sistema concentrador constituido por superficies reflectoras que interceptan, concentran y reflejan la radiación solar dirigiéndola hacia el receptor que se encarga de captar esta radiación concentrada e introducirla en el sistema. Una vez que la radiación concentrada llega al receptor, éste la convierte en energía térmica mediante una transferencia de energía al fluido de trabajo. Por último, el sistema de conversión de energía térmica transforma esta energía en energía eléctrica.

De aquí la importancia del fluido caloportador, ya que es el que se encarga de transferir esta energía térmica, a otro fluido que trabajará en el bloque de potencia que a su vez producira esa energía eléctrica que buscamos o incluso se puede almacenar con sistemas de almacenamiento de energía, lo que permite seguir suministrando energía en ausencia de radiación solar.

Hoy en día en el mercado existen una gran cantidad de fluidos termicos: Aceites térmicos, sales fundidas, vapor de agua, aire, etc....Cada uno con unas características propias que los hacen adecuados para un tipo concreto de centrales (en función del objetivo que se proponga y su tecnología). Como en el caso de este proyecto se ha querido investigar el aumento de las temperaturas de los fluidos térmicos en centrales termosolares a alta temperatura, los unicos fluidos viables para este tipo de trabajos serían las sales fundidas, que son aquellas que tienen unas capacidades térmicas buenas y ademas pueden alcanzar elevadas temperaturas de trabajo.

Tenemos el ejemplo del Hitec que puede trabajar con unas temperaturas operativas de unos 500 y 538 °C, con capacidades caloríficas entorno a los 1,56 kJ/kgK.

La salida que se estudia o que se está investigando hoy en día, en la búsqueda de este aumento de los límites de temperaturas de las sales fundidas actuales (>800°C), es hacer uso de sales de cloruro y carbonatos que son las más prometedoras.

Las sales de carbonato tienen puntos de fusión moderados (> 390°C), altos límites de estabilidad térmica (> 650°C) y altas capacidades de calor, pero precios altos debido a la utilización del costoso  $Li_2CO_3$  para bajos puntos de fusión.

Las sales de cloruro tienen puntos de fusión moderados (<400°C), altos límites de estabilidad térmica (> 800°C), capacidades de calor moderadas y precios bajos. Esto hace que las sales de cloruro sean las mas interesante de cara a su estudio.

Los principales problemas con los que se encuentran o los mayores retos de utilizar este tipo de sales, es que al

aumentar tanto las temperaturas del fluido, esto implica mayor corrosividad de las aleaciones metálicas utilizadas como recipientes y materiales estructurales. Limitando la vida útil de los materiales y aumentando a su vez el coste.

Se hizo un estudio del arte, analizando las propiedades de aquellas sales de cloruros más prometedoras y las cuales se han analizado con mas detenimiento. Dentro de estas sales, podemos distinguir 3 grupos, las sales unitarias, las mezclas binarias y las mezclas ternarias.

Como se comentó con anterioridad las sales de cloruros son muy prometedoras pero cada una de ellas tiene unas ciertas desventajas, con lo cual se plantean mezclas binarias y ternarias de sales de cloruro con la intención de paliar o reducir de alguna forma estas desventajas.

El cloruro de aluminio ( $AlCl_3$ ) dispone de muy buena viscosidad (bajo valor), pero trabaja con elevadas presiones de vapor por lo tanto no es útil como fluido de transferencia pero su mezcla con otras sales, si podría ser útil.

El cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ ) tiene bajo punto de fusión y trabaja a bajas presiones de vapor por lo general, pero la viscosidad a bajas temperaturas se eleva bastante. Recomendable su uso en mezclas.

El cloruro de sodio ( $NaCl$ ) tiene un coste relativamente bajo debido a su gran abundancia, tiene baja viscosidad y trabaja con presiones de vapor bajas.

El cloruro de potasio ( $KCl$ ) tiene viscosidad baja y lo hace recomendable para mezclas eutécticas.

La mezcla de  $NaCl + AlCl_3$  tiene un punto de fusión bajo y en general dispone de bajas viscosidades.

La mezcla de  $KCl + AlCl_3$  tiene un punto de fusión relativamente bajo.

El sistema ternario  $NaCl + KCl + AlCl_3$  tiene dos combinaciones en las cuales dispone de un punto de fusión bajo, aunque no se dispone de información de las presiones de vapor en las que trabaja, pero como el  $AlCl_3$  trabaja con altas presiones de vapor, el uso de esta mezcla puede ser problemática (no se recomienda como fluido HTF).

El sistema ternario  $NaCl + KCl + ZnCl_2$  tiene tres combinaciones en las cuales pueden tener temperaturas de fusión por debajo de los  $250^\circ\text{C}$ . Gracias al  $ZnCl_2$ , puede trabajar con presiones de vapor muy bajas, con viscosidades de valores medios del orden de  $43,52 * 10^{-3} \text{ Pa} * \text{s}$  y densidades medias de valores entorno los  $2430 \text{ kg/m}^3$  y por lo tanto estas adecuadas propiedades hacen que esta mezcla sea muy prometedora como fluido HTF.

# REFERENCIAS

---

- [1] <https://www.psa.es/es/instalaciones/fresnel/fresdemo.php>
- [2] Grena, R. and P. Tarquini, Solar linear Fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid. *Energy*. 36(2): p. 1048-1056.
- [3] Kiera, M., W. Meinecke, and H. Klaiss, Energetic comparison of solar thermal power plants. *Solar Energy Materials*, 1991. 24(1&4): p. 121-135.
- [4] Greenpeace, S., ESTELA, Energía Solar Térmica de Concentración: Perspectiva mundial 2009.
- [5] Álvarez, M.R., Energía solar termoeléctrica. Plataforma Solar de Almería CIEMAT.
- [6] Gil, A., et al., State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1--Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14(1): p. 31-55.
- [7] Kenisarin, M. and K. Mahkamov, Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007. 11(9): p. 1913- 1965.
- [8] Adinberg, R., D. Zvegilsky, and M. Epstein, Heat transfer efficient thermal energy storage for steam generation. *Energy Conversion and Management*. 51(1): p. 9-15.
- [9] Kato, Y., et al., Study on medium-temperature chemical heat storage using mixed hydroxides. *International Journal of Refrigeration*, 2009. 32(4): p. 661- 666.
- [10] SENER and Torresol Energy win U.S. CSP Today awards. *Renewable Energy Focus*. 12(4): p. 12.
- [11] D. Kearney, et al., *Journal of solar energy engineering*, 125(2003).
- [12] M. Eck, et al., Direct steam generation in parabolic troughs at 500degC - First results of the REAL-DISS project, SolarPACES 2011 – Granada.
- [13] T. Achenbach, et al. Development of an edge module for open volumetric receiver for the use of the radiation at the receiver boundary region, SolarPACES 2011 – Granada.
- [14] O.J. Foust, (1972), *Sodium-NaK engineering handbook*, Liquid metal engineering centre, New York.
- [15] W.J.C. Schiel, et al., *Solar Energy*, 41(1988)255 – 265.



- [16] W. Ding, A. Bonk, T. Bauer. "Corrosion behavior of metallic alloys in molten chloride salts for thermal energy storage in concentrated solar power plants – A review." *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, accepted. <https://doi.org/10.1007/s11705-018-1720-0>
- [17] M. Mehos, C. Turchi, J. Vidal, M. Wagner, Z. Ma, C. Ho, W. Kolb, C. Andraka, A. M. Kruizenga. "Concentrating solar power Gen3 demonstration roadmap." Technical Report: NREL/TP-5500-67464. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO (2017).
- [18] A. Kruizenga. "Corrosion mechanisms in chloride and carbonate salts." Sandia National Laboratories, Livermore, CA Report No. SAND2012-7594, 2012.
- [19] "Physical constants of inorganic compounds." In: Lide D, editor. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*: CRC Press (2006).
- [20] M. W. Chase. "Jr. NIST-JANAF Thermochemical Tables." 4th ed.; J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph 9, National Institute of Standards and Technology (NIST): Gaithersburg, MD (1998).
- [21] C. Li, P. Li, K. Wang, E.E. Molina. "Survey of properties of key single and mixture halide salts for potential application as high temperature heat transfer fluids for concentrated solar thermal power systems." *AIMS Energy*, 2014, 2(2):133-157:
- [22] A.F. Holleman, E. Wiberg. "Inorganic chemistry." San Diego: Academic Press (2001).
- [23] N.K. Voskresenskaya. "Handbook of solid-liquid equilibria in systems of anhydrous inorganic salts" – Vol. 1 and 2 (translated from Russian). Jerusalem: Keter Press (1961).
- [24] P.D. Myers, D.Y. Goswami. "Thermal energy storage using chloride salts and their eutectics." *Applied Thermal Engineering*, 2016, 109, Part B: 889-900.
- [25] Linsinger S., Radtke T., "Entwicklung von niedrigschmelzenden Salzmischungen auf Basis von NaCl/KCl zur Anwendung in solarthermischen kraftwerken (Development of Chloridic Molten Salt for use as Heat Transfer and Heat Storage Medium in Thermal Power Plants)." *Kali und Steinsalz*, 2013, 3(Rubrik – Technik und Anwendung):28-37.
- [26] D.F. Williams. "Assessment of candidate molten salt coolants for the NGNP/NHI heat-transfer loop." Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2006/69 (2006).
- [27] G.J. Janz, C.B. Allen, N.P. Bansal. "Physical properties data compilations relevant to energy storage. II. Molten salts: Data on single and multi-Component salt systems." *NSRDB-NBS 61 Part II* (1979).
- [28] Robelin C, Chartrand P, Pelton A (2004) Thermodynamic Evaluation and Optimization of the (NaCl + KCl + AlCl<sub>3</sub>) System. *J Chem Thermodyn* 36: 683-699.
- [29] Robelin C, Chartrand P (2011) Thermodynamic evaluation and optimization of the (NaCl + KCl + MgCl<sub>2</sub> + CaCl<sub>2</sub> + ZnCl<sub>2</sub>) system. *J Chem Thermodyn* 43: 377-391.

- [30] Pacheco J E (2002) Final test and evaluation results from the solar-two project. Sandia National Laboratories. SAND2002-0120.
- [31] Mar R W, Kramer C M (1981) Pressure–temperature–composition relationships for heated draw salt systems. *Sol Energ Mat* 5: 71-79.
- [32] Herrmann U, Kelly B, Price H (2004) Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants. *Energy* 29: 883-893.
- [33] <https://solarpaces.nrel.gov/archimede>
- [34] Geyer M, Herrmann U, Sevilla A, et al. (2006) Dispatchable solar electricity for summerly peak loads from the solar thermal projects andasol-1 and andasol-2. Seville, Spain: Solar millennium, SolarPACES.
- [35] Steinmann W D (2007) Development of thermal energy storage. Freiburg (Germany): Workshop of the European Solar Thermal Technology Platform.
- [36] Herrmann U (2002) Survey of thermal energy storage for parabolic trough power plants. *J Sol Energ Eng* 124: 145–152.
- [37] Badger Energy Corp (1981) Design, handling, operation and maintenance procedures for Hitec molten salt. Sandia National Laboratories, SAND81-8179.
- [38] Kolb G J (2008) Conceptual design of an advanced trough utilizing a molten salt working fluid. Presented at SolarPACES Symposium, Las Vegas, Nevada.
- [39] Raade J W, Padowitz D (2001) Development of Molten Salt Heat Transfer Fluid With Low Melting Point and High Thermal Stability. *J Sol Energ Eng* 133: 031013.
- [40] Herrmann U, Kearney D W (2002) Survey of thermal storage for parabolic trough power plants. *J Sol Energ Eng*, 124: 145-152.
- [41] Janz G J (1981) Physical properties data compilations relevant to energy storage. NSRDS-NBS 61. Parts I, II, and IV.
- [42] Bradshaw R W, Siegel N P (2009) Development of molten nitrate salt mixtures for concentrating solar power systems. SolarPACES, Berlin.
- [43] Foster M (2002) Theoretical investigation of the system SnOx/Sn for the thermochemical storage of solar energy. Proceedings of the 11th SolarPACES. International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies.
- [44] Herrmann U, Kelly B, Price H (2004) Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants. *Energy* 29: 883-93.
- [45] Brosseau D A, Hlava P F, Kelly M J (2004) Testing of Thermocline Filler Materials and Molten-Salt Heat Transfer Fluids for Thermal Energy Storage Systems Used in Parabolic Trough Power Plants. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM and Livermore, CA, Technical Report No. SAND2004-3207.

- [46] Kearney D, Herrmann U, Nava P, et al. (2003) Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field. *J Sol Energ–T ASME* 125: 170-176.
- [47] Pacheco J E, Showalter S K, Kolb W J (2001) Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants. *ASME Proceedings of Solar Forum Solar Energy: The Power to Choose*, Washington, DC, April 21-25.
- [48] Bradshaw R W (2010) Viscosity of Multi-Component Molten Nitrate Salts—Liquidus to 200 °C. Sandia National Laboratory, Livermore, CA, Technical Report No. SAND2010-1129.
- [49] St Laurent S J, Kolb W J, Pacheco J E (2000) Thermocline Thermal Storage Tests for Large-Scale Solar Thermal Power Plants. Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM, Technical Report No. SAND2000-2059C.
- [50] Bauer T, Laing D, Tamme R (2011) Recent Progress in Alkali Nitrate/Nitrite Developments for Solar Thermal Power Applications. *Molten Salts Chemistry and Technology*, MS9, Trondheim, Norway, June 5-9.
- [51] Bradshaw R W, Siegel N P (2008) Molten Nitrate Salt Development for Thermal Energy Storage in Parabolic Trough Solar Power Systems, *ASME Proceedings of Energy Sustainability (ES2008)*, Jacksonville, FL, August 10–14, ASME Paper No. ES2008-54174.
- [52] Flueckiger S, Yang Z, Garimella S V (2011) An Integrated Thermal and Mechanical Investigation of Molten-Salt Thermocline Energy Storage. *Appl Energ* 88: 2098-2105.
- [53] Judith C Gomez<sup>1</sup>, Nicolas Calvet, Anne K. Starace, et al. (2013)  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ — $\text{NaNO}_3$ — $\text{KNO}_3$  Molten Salt Mixtures for Direct Thermal Energy Storage Systems in Parabolic Trough Plants. *J Sol Energ Eng* 135: 021016.
- [54] Menzies A W C, Dutt N N (1911) The Liquidus Surface of the Ternary System Composed of the Nitrates of Potassium, Sodium, and Calcium. *J Am Chem Soc* 33: 1366-1375.
- [55] Jänecke E (1942) The Quaternary System Na,K,Ca,Mg //  $\text{NO}_3$  and Its Subsystems. *Z. Elektrochem. Angew. Phy Chem* 48: 453-512 (in German).
- [56] Bergman A G, Rassonskaya I S, Shmidt N E (1955) *Izvest. Sektora. Fiz.-Khim. Anal., Inst. Obshch. Neorg. Khim., Tr Fiz Inst Akad Nauk SSSR* 26: 156-163.
- [57] Levin E M, McMurdie H F, Hall F P (1956) Phase Diagrams for Ceramists, In: *The American Ceramic Society*, Columbus; OH, Vol. 1.
- [58] Reddy R G (2010) Novel Molten Salts Thermal Energy Storage for Concentrating Solar Power Generation. U.S. Department of Energy, Solar Energy Technologies Program Peer Review.
- [59] Wang T, Mantha D, Reddy R G (2012) Thermal stability of the eutectic composition in  $\text{LiNO}_3$ — $\text{NaNO}_3$ — $\text{KNO}_3$  ternary system used for thermal energy storage. *Sol Energ Mat Sol C* 100: 162-168.
- [60] Coscia K, Nelle S, Elliot T, et al. (2013) Thermophysical Properties of  $\text{LiNO}_3$ — $\text{NaNO}_3$ — $\text{KNO}_3$  Mixtures for Use in Concentrated Solar Power. *J Sol Energ Eng* 135: 034506.
- [61] Bradshaw R W, Meeker D E (1990) High-Temperature Stability of Ternary Nitrate Molten Salts for Solar Thermal Energy Systems. *Sol Energ Mat* 21: 51-60.

- [62] Bradshaw R W, Tyner C E (1988) Chemical and Engineering Factors Affecting Solar Central Receiver Applications of Ternary Molten Salts. Sandia National Laboratories, Report No.SAND88-8686.
- [63] Zhao C Y, Wu Z G (2011). Thermal property characterization of a low melting-temperature ternary nitrate salt mixture for thermal energy storage systems. *Sol Energ Mat Sol C* 95: 3341-3346.
- [64] Bradshaw R W, Brosseau D A (2009) Low-Melting Point Inorganic Nitrate Salt Heat Transfer Fluid. USPO, Patent No. 7,588,694.
- [65] Wang T, Mantha D, Reddy R G (2013) Thermodynamic properties of  $\text{LiNO}_3\text{--NaNO}_3\text{--KNO}_3\text{--2KNO}_3\cdot\text{Mg(NO}_3)_2$  system. *Thermochim Acta* 551: 92-98.
- [66] Wang T, Mantha D, Reddy R G (2013) Novel low melting point quaternary eutectic system for solar thermal energy storage. *Appl Energ* 102: 1422-1429.
- [67] Kenisarin M M (2010) High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renew Sust Energ Rev* 14: 955-70.
- [68] Janz G J, Allen C B, Bansal N P (1979) Physical Properties Data Compilations Relevant to Energy Storage. II. Molten Salts : Data on Single and Multi-Component Salt Systems, NSRDB-NBS 61 Part II.
- [69] <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=7446700&Units=SI>
- [70] Poling B E, Thomson G H, Friend D G (2008) Physical and Chemical Data Section 2, Perry's Chemical Engineers' Handbook, 8th Edition.
- [71] Keneshea F J, Cubicciotti D (1964) Vapor Pressures of Zinc Chloride and Zinc Bromide and Their Gaseous Dimerization. *J Chem Phys* 40: 191-199.
- [72] Cubicciotti D, Eding H (1964) Heat Contents of Molten Zinc Chloride and Bromide and the Molecular Constants of the Gases. *J Chem Phys* 40: 978-982.
- [73] Wachter A, Hildebrand J H (1930) Thermodynamic Properties of Solutions of Molten Lead Chloride and Zinc Chloride. *J Am Chem Soc* 52: 4655-4661.
- [74] Pedersen S (2001) Viscosity, structure and glass formation in the  $\text{AlCl}_3\text{--ZnCl}_2$  system. Ph.D thesis (Institut for Kjemi, Norges Tekniskurn-Naturvitenskaplige Universitet, 2001).
- [75] Douglas S Rustad, Norman W Gregory (1983) Vapor Pressure of Iron(III) Chloride. *J Chem En Data* 28: 151-155.
- [76] Nitta K, Nohira T, Hagiwara R. (2009) Physicochemical properties of  $\text{ZnCl}_2\text{--NaCl--KCl}$  eutectic melt. *Electrochim Acta* 54: 4898-4902.
- [77] Vignaroobana K., Pugazhendhi P, Tucker C, et al. (2014) Corrosion resistance of Hastelloys in molten metal-chloride heat-transfer fluids for concentrating solar power applications, *Solar Energy* 103: 62-69.

- [78] Lawrence L. Kazmerski National Renewable Laboratory, USA Renewable & Sustainable Energy Reviews
- [79] Trunin AS. Designing and investigations of salt systems for solar energy utilization. In: Utilization of sun and other radiation sources in materials research. Kiev: Naukova Dumka; 1983. p. 228–38 [in Russian].
- [80] Babaev BD. System NaF–NaCl–NaNO<sub>3</sub>. Inorg Mater 2002;38(1):83–4.
- [81] Gubanova TV, Kondratyuk IM, Garkushin IK. The LiF–LiCl–LiVO<sub>3</sub>–Li<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> quaternary system. Russ J Inorg Chem 2004;49(7).
- [82] Gubanova TV, Garkushin IK. The system LiF–LiCl–LiVO<sub>3</sub>–Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–Li<sub>2</sub>MO<sub>4</sub>. Russ J Inorg Chem 2007;52(10).
- [83] Gubanova TV, Kondratyuk IM, Garkushin IK. The LiF–LiCl–Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–Li<sub>2</sub>MO<sub>4</sub> quaternary system. Russ J Inorg Chem 2006;51(3):474–7.
- [84] Trunin AS, Shakhovkin OB, Garkushin IK, Miftakhov TT, Dibirov MA. Heat storage salt mix. USSR Patent 1028706; 1983.
- [85] Philips WM, Stears JW. Advanced latent heat of fusion thermal energy storage for solar power stations. In: Proceedings of 20th intersociety energy conversion engineering conference 2; 1985. p. 384–91.
- [86] Gubanova TV, Frolov EI, Garkushin IK. LiF–LiVO<sub>3</sub>–Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–Li<sub>2</sub>MO<sub>4</sub> four-component system. Russ J Inorg Chem 2007;52(2):308–11.
- [87] Mayo KE. Heat source systems. USA Patent 3605720; 1971.
- [88] Vasina NA, Gryzlova VA, Korobova VA, Kondratenkov VI, Pakhshin, Trush FF. Heat storage composition. USSR Patent 1102800; 1984.
- [89] Eichelberger JI, Gillman HD. Investigation of metal fluoride thermal energy storage material. In: Proceedings of 12th intersociety energy conversion engineering conference; 1977. p. 567–74.
- [90] Heidenreich GR, Parekh MB. Thermal energy storage for organic Rankine cycle solar dynamic space power systems. In: Proceedings of 21st intersociety energy conversion engineering conference 2; 1986. p. 791–7.
- [91] Gubanova TV, Garkushin IK. Three component system LiF–LiVO<sub>3</sub>–Li<sub>2</sub>MO<sub>4</sub> and LiVO<sub>3</sub>–Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–Li<sub>2</sub>MO<sub>4</sub>. Russ J Inorg Chem 2005;50(11).
- [92] Marianowski LG, Maru HC. Latent heat thermal energy storage systems above 450 °C. In: Proceedings of 12th intersociety energy conversion engineering conference; 1977. p. 555–66.
- [93] Maru HC, Dullea JF, Kardas A, Paul L, Marianowski LG, Ong E, et al. Molten salts energy storage systems. Chicago, IL: Final Report of the Institute of Gas Technology; 1978.

- [94] Babaev BD, Gasanaliyev AM. Phase diagram of the system  $\text{LiF-NaF-CaF-BaF}_2\text{-BaMo}_4$ . *Inorg Mater* 2003;39(11):1203–7.
- [95] Verdiev NN, Arbukhanova PA, Iskenderov EG.  $\text{NaF-NaBr-Na}_2\text{MoO}_4$  and  $\text{KF-KCl-KBr}$  ternary systems. *Russ J Inorg Chem* 2009;54(1):128–33.
- [96] Garkushin IK, Trunin AC, Voronin KYu, Dibirov MA, Gnilomedov AA. Heat storage fluoride composition. USSR Patent 1018957; 1983.
- [97] Verdiev NN, Iskenderov EG, Arbukhanova PA, Amadziev AM. Three-component system  $\text{Na/F, Cl, Br}$ . *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazskii Region. Nat Sci* 2006;(Suppl. 5):56–61 [in Russian].
- [98] Trunin AC, Garkushin IK, Voronin KYu, Dibirov MA and MOshenskii YuV. Heat storage composition. USSR Patent 1089100; 1984.
- [99] Misra AK, Whittenberger JD. Fluoride salts and container materials for thermal energy storage applications in the temperature range 973 to 1400 K. In: Paper presented at 22nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (AIAA-87-9226); 1987. p.22.
- [100] Whittenberger JD, Misra AK. Identification of salt-alloy combinations for thermal energy storage. Applications in advanced solar dynamic power systems. *J Mater Eng* 1987;9(3):293–302.
- [101] Schroöder J. Heat accumulator. US Patent 3,779,232; 1973.
- [102] Arbukhanova PA, Dibirov YaA, Verdiev NN, Vainstein SI. The system  $\text{CaF}_2\text{-CaSO}_4\text{-CaMoO}_4$  *Izvestiya VUZov. Khim khimicheskaya tekhnol* 2009;52(2):36–8 [in Russian].
- [103] Venkatesetty HV, LeFrois RT. Thermal energy storage for solar power plants. In: Proceedings of 11th intersociety energy conversion engineering conference; 1976. p. 606–12.
- [104] Garkushin IK, Trunin AC, Miftakhov TT, Dibirov MA. Salt heat storage composition. USSR Patent 1036734; 1983.
- [105] Trunin AS, Shakhovkin OB, Miftakhov TT, Garkushin IK, Gnilomedov AA. Heat storage salt mix. USSR Patent 986916; 1983.
- [106] Abe Y, Kamimoto M, Sakamoto R, Takahashi Y, Kanari K, Ozawa T. Peak load coverage by molten salts latent thermal storage. In: Proceedings of 19th intersociety energy conversion engineering conference; 1984. p. 1114–9.
- [107] Garkushin IK, Gubanova TV, Kondratyuk IM, Arkhipov GM, Bataliv NN. Heat storage composition. Russian Patent 2272823; 2006.
- [108] Chubb TA. Thermal energy storage material comprising mixtures of sodium, potassium and magnesium chlorides. US Patent 4119556; 1978.
- [109] Lekomtseva TV, Anipchenko BV, Garkushin IK. The  $\text{LiCl-Li}_2\text{SO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4$  system. *Russ J Inorg Chem* 2002;47(9).

- [110] Lekomtseva TV, Anipchenko BV, Garkushin IK. The LiCl–Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–LiVO<sub>3</sub> system. Russ J Inorg Chem 2002;47(10).
- [111] Turovskii VB, Shter GE, Trunin AS, Savushkina IN. Energy capacity salt composition on the basis fluoride and chlorides of lithium and magnesium. In: Utilization of Sun and Other Radiation Sources in Materials Research. Kiev: Naukova Dumka; 1983, p. 238–243 (in Russian).
- [112] Iskenderov EG, Verdiev NN, Vainshtein SI. Phase equilibrium in NaCl–NaBr–Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> system. Russ J Inorg Chem 2007;52(3).
- [113] Dibirov YaA, Arbukhanova PA, Vainstein SI, Verdiev NN. Phase equilibrium in CaCl<sub>2</sub>–CaSO<sub>4</sub>–CaMoO<sub>4</sub> system. Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazskii Region. Nat Sci 2009;1:49–51 [in Russian].
- [114] Kenisarin MM. Short-term storage of solar energy 1. Low temperature phasechange materials. Appl Solar Energy 1993;29(2):48–65.
- [115] Gasanaliev AM, Gamataeva BYu. Heat-accumulating properties of melts. Russ Chem Rev 2000;69(2):179–86.
- [116] Takahashi Y, Kamimoto M, Abe Y, Sakamoto R, Kanari K, Ozawa T. Investigation of latent heat-thermal energy storage materials IV. Thermoanalytical evaluation of binary eutectic mixtures of NaOH with LiOH or KOH. Thermochim Acta 1987;121:193–202.
- [117] Petri RJ, Ong ET. High temperature composite thermal energy storage (TES) systems for industrial applications. In: Proceedings of 21st intersociety energy conversion engineering conference 2; 1986. p. 873–80.
- [118] Verdiev NN, Dibirov YaA, Arbukhanova PA, Vainshtein SI. Three-component reciprocal system Li, Ca/SO<sub>4</sub> MoO<sub>4</sub>. Moscow Univ Chem Bull 2009;50(2): 111–6.
- [119] Verdiev NN, Iskenderov EG, Arbukhanova PA, Amedziev AM. Phase equilibrium in KBr–K<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> system. Izvestiya VUZov Khimiya khimicheskaya tekhnol 2006;49(9):26–8 [in Russian].
- [120] Birchenall CE, Riechman AF. Heat storage in eutectic alloys. Metall Trans A 1980;11A(8):1415–20.
- [121] Kamimoto M. Enthalpy measurements on LiNO<sub>3</sub> and NaNO<sub>2</sub> by twin hightemperature calorimeter. Thermochim Acta 1980;41:361–9.
- [122] Takahashi Y. Latent heat measurement by DSC with sapphire as standard material. Thermochim Acta 1985;88(1):199–204.
- [123] Takahashi Y, Sakamoto R, Kamimoto M. Heat capacities and latent heats of LiNO<sub>3</sub>, NaNO<sub>3</sub>, and KNO<sub>3</sub>. Electrochemical Laboratory Technical Report TR-88-2; 1988, 17 p.
- [124] Tufen R, Petit JP, Denielou I, Le Neindre B. Experimental determination of the thermal conductivity of molten pure salts and salt mixtures. Int J Thermophys 1985;6(4):315–30.

- [125] Nagasaka Y, Nakazawa N, Nagashima A. Experimental determination of the thermal diffusivity of molten alkali halides by the forced Rayleigh scattering method. II. Molten NaBr, KBr, RbBr and CsBr. *Int J Thermophys* 1992;13(4): 555–74.
- [126] Nakazawa N, Nagasaka Y, Nagashima A. Experimental determination of the thermal diffusivity of molten alkali halides by the forced Rayleigh scattering method. I. Molten LiCl, NaCl, KCl, RbCl and CsCl. *Int J Thermophys* 1992;13(5): 753–62.
- [127] Araki N, Matsuura M, Makino T, Kato Y. Measurement of thermophysical properties of molten salts: mixtures of alkaline carbonate salts. *Int J Thermophys* 1988;9(6):1071–80.
- [128] do Couto Aktay KS, Tamme R, Müller-Steinhagen H. Thermal conductivity of high-temperature multicomponent materials with phase change. *Int J Thermophys* 2008;29:678–92.
- [129] Bauer T, Tamme R, Christ M, Ottlinger O. PCM-graphite composites for high temperature thermal energy storage. In: Presentation at the Ecstock'2006—10th international conference on thermal energy storage; 2006.
- [130] Dincer I, Rosen M (2002) *Thermal energy storage: systems and applications*: John Wiley & Sons.
- [131] Badcock J, Lenzen M (2010) Subsidies for electricity-generating technologies: A review. *Energy Policy* 38: 5038-5047.
- [132] Thirugnanasambandam M, Iniyan S, Goic R (2010) A review of solar thermal technologies. *Renew Sust Energ Rev* 14: 312-322.
- [133] Solangi K H, Islam M R, Saidur R, Rahim N A, et al. (2011) A review on global solar energy policy. *Renew Sust Energ Rev* 15: 2149-2163.
- [134] Therminol VP-1 heat transfer fluid by Solutia. (1999) Technical Bulletin 7239115B, Solutia, Inc.
- [135] Dowtherm A heat transfer fluid. (1997) Form No. 176-1337-397 AMS, Dow Chemical Company.
- [136] Wang J, Xie H, Xin Z, et al. (2010) Enhancing thermal conductivity of palmitic acid based phase change materials with carbon nanotubes as fillers. *Solar Energy* 84: 339-344.
- [137] Kolb G J (2008) Conceptual design of an advanced trough utilizing a molten salt working fluid. Las Vegas Nevada: SolarPACES.
- [138] Kelly B, Price H, Brosseau D, et al. (2007) Adopting nitrate/nitrite salt mixtures as the heat transport fluid in parabolic trough power plants. American Society of Mechanical Engineers conference. pp. 1033-1040.
- [139] Reilly H, Kolb G (2001) Evaluation of Molten Salt Power Tower Technology Based on Experience at Solar Two. SAND: Sandia National Laboratories, 2001-3674.
- [140] Wendelin T (2006) Parabolic Trough VSHOT Optical Characterization in 2005–2006, NREL, <[www.nrel.gov/docs/fy06osti/40024.pdf](http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/40024.pdf)>.



- [141] Diver R B, Andraka C, Rawlinson S (2001) The advanced dish development system project. ASME Proceedings of Solar Forum, Washington D.C.
- [142] Becker M (1980). Comparison of heat transfer fluids for use in solar thermal power stations. *Electr Pow Syst Res* 3: 139-150.
- [143] Kearney D (2004) Engineering aspects of a molten salt heat transfer fluid in a trough solar field. *Energy* 29: 861-870.
- [144] Blake D M (2002) New Heat Transfer and Storage Fluids for Parabolic Trough Solar Thermal Electric Plants. Proceedings of the 11th SolarPACES International Symposium On concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies. Zurich, Switzerland.
- [145] Zalba B (2003) Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Therm Eng* 23: 251-283.
- [146] Kenisarin M M (2010) High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renew Sust Energ Rev* 14: 955-970.
- [147] Gil A, Medrano M, Martorell I, et al. (2010) State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. *Renew Sust Energ Rev* 14: 31-55.
- [148] Medrano M, Gil A, Martorell I, et al. (2010) State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies. *Renew Sust Energ Rev* 14: 56-72.
- [149] Phillips W M, Stearns J W (1985) Advanced latent heat of fusion thermal energy storage for solar power systems. Proceedings of the 20th intersociety energy conversion engineering conference, 2: 384-91.
- [150] Fujiwara M, Sano T, Suzuki K, et al. (1988) Thermal analysis and fundamental tests on heat pipe receiver for solar dynamic space power system. Proceedings of the 23rd intersociety energy conversion engineering conference 2: 195-200.
- [151] Christian L B (2007) Molten salts and nuclear energy production. *J Nucl Mater* 360: 1-5.
- [152] Shin B C, Kim S D, Park W H (1990) Ternary carbonate eutectic (lithium, sodium and potassium carbonates) for latent heat storage medium. *Sol Energ Mater* 21: 81-90.
- [153] Mamantov G, Braunstein J, Mamantov C B (1981) *Advances in molten salt chemistry*. New York: Plenum Press.
- [154] Kenisarin, M M (2010) High temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renew Sust Energy Rev* 14: 955-970.
- [155] Takahashi Y, Kamimoto M, Abe Y, Sakamoto R, Kanari K, Ozawa T. Investigation of latent heat-thermal energy storage materials V. Thermoanalytical evaluation of binary eutectic mixtures of NaOH with NaNO<sub>3</sub> or NaNO<sub>2</sub>. *Thermochim Acta* 1988;123:239–45.
- [156] Alan M. Kruizenga, *Corrosion Mechanisms in Chloride and Carbonate Salts*, SANDIA REPORT

- [157] [http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4840/fichero/2\\_TECNOLOGIA\\_TERMOSOLAR.pdf](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4840/fichero/2_TECNOLOGIA_TERMOSOLAR.pdf)
- [158] W. Ding, H. Shi, Y. Xiu, A. Bonk, A. Weisenburger, A. Jianu, T. Bauer. "Hot corrosión behavior of comercial alloys in termal energy storage material of molten  $\text{MgCl}_2/\text{KCl}/\text{NaCl}$  under inert atmosphere." *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2018, 184: 22-30.
- [159] W. Ding, A. Bonk, J. Gussone, T. Bauer. "Electrochemical measurement of corrosive impurities in molten chlorides for termal energy storage." *Journal of Energy Storage*, 2018, 15: 408-414.
- [160] W. Ding, A. Bonk, J. Gussone, T. Bauer. "Cyclic voltammetry for monitoring corrosive impurities in molten chlorides for termal energy storage." *Energy Procedia*, 2017, 135: 82-91.
- [161] W. Ding, H. Shi, Y. Xiu, A. Weisenburger, A. Jianu, T. Bauer. "Molten chloride salts for next generation concentrated solar power plants: Mitigation strategies against corrosión of structural materials. "Solar Energy Materials and Solar Cells, under review.
- [162] Johannes P. Kotzé, Theodor W. von Backström, Paul J. Erens, NaK as a primary heat transfer fluid in thermal solar power installations.

## GLOSARIO

Adsorción	Proceso por el cual átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos disueltos son retenidos en una superficie.
Bromuro	Es un átomo con carga eléctrica -1, es decir, con un electrón adicional. Los bromuros son compuestos donde el bromo actúa con estado de oxidación -1.
Campo solar	Zona donde se colocan el conjunto de concentradores solares, para dirigir la radiación solar hacia el receptor.
Carbonatos	Son las sales del ácido carbónico o ésteres con el grupo $R-O-C(=O)-O-R'$ .
Central termoeléctrica	Es una instalación empleada en la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada por combustibles fósiles como petróleo, gas natural, carbón y núcleos de uranio. Este calor es empleado por un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica, liberando dióxido de carbono a la atmósfera.
Central Gemasolar	Es una planta de energía termosolar de concentración con sistema de almacenamiento térmico de sales fundidas propiedad de Torresol Energy. Está situada en el término municipal de Fuentes de Andalucía, en la provincia de Sevilla, España.
Central Híbrida	Tipo de instalación que recibe energías que puede recibir varios tipos de energía a partir de la cual puede generar energía eléctrica o de otro tipo.
Central termosolar	Es una instalación industrial en la que, a partir del calentamiento de un fluido mediante radiación solar y su uso en un ciclo termodinámico convencional, se produce la potencia necesaria para mover un alternador para generación de energía eléctrica como en una central termoeléctrica clásica.
Ciclo de potencia	Conjunto de elementos mecánicos que conforman un ciclo termodinámico que tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo.
Concentrador	Tipo de colector solar capaz de concentrar la energía solar en un área reducida, aumentando la intensidad energética.
Cloruros	Son compuestos que llevan un átomo de cloro en estado de oxidación formal -1. Por lo tanto corresponden al estado de oxidación más bajo de este elemento ya que tiene completada la capa de valencia con ocho electrones.
Densidad de energía	Representa la cantidad de energía acumulada en un sistema dado o en una región del espacio, por unidad de volumen en un punto.
Disociación química	Es un proceso general en el cual complejos, moléculas y/o sales se separan en moléculas más pequeñas, iones o radicales, usualmente de manera reversible.
Dowtherm A	Es un fluido de transferencia de calor, mezcla eutéctica de dos compuestos muy estables, bifenilo y óxido de difenilo.

Fluoruros	Son las sales del ácido fluorhídrico (HF) y tienen como anión el $F^-$ .
Fotovoltaica	Fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina.
Halogenadas	Sustancias químicas orgánicas que contienen uno ó varios átomos de un elemento halógeno.
Haluros	Es un compuesto binario en el cual una parte es un átomo halógeno y la otra es un elemento, catión o grupo funcional que es menos electronegativo que el halógeno.
Helióstato	Es un conjunto de espejos que se mueven sobre dos ejes normalmente en montura altazimutal (altura y azimut), lo que permite, con los movimientos apropiados, mantener el reflejo de los rayos solares que inciden sobre él en todo momento en un punto o pequeña superficie.
Hidrato	Término utilizado en química orgánica y química inorgánica para indicar que una sustancia contiene agua.
Hidróxido	Son un grupo de compuestos químicos formados por un metal y el grupo funcional OH, denominado grupo hidróxido, que actúa con número de oxidación -1.
Higroscópicos	Sustancia capaz de absorber humedad el medio.
Hitec	Aceite térmico.
Iniciativa Sunshot	Programa perteneciente a la oficina de eficiencia energética y energías renovables del departamento de energía de los Estados Unidos. Su trabajo se centra en cinco áreas: fotovoltaica, concentración de energía solar, balance de sistema de costes, integración de sistemas y tecnología para el mercado.
Metales alcalinos	Son un grupo de elementos que forman una serie química. Estos elementos se encuentran situados en el grupo 1 de la tabla periódica.
Motor Stirling	Motor térmico operando por compresión y expansión cíclica de aire u otro gas, el llamado fluido de trabajo, a diferentes niveles de temperatura tales que se produce una conversión neta de energía calorífica a energía mecánica.
Nitrato	Son sales o ésteres del ácido nítrico $HNO_3$ .
Nítrito	Anión angular con una configuración electrónica y una disposición angular similar a la del ozono. $NO_2^-$ .
Paraboloide de revolución	Superficie resultante de girar una parábola en torno a su eje de simetría.
Planta Andasol	Central eléctrica de energía solar de concentración. Es el primer complejo termosolar del mundo con almacenamiento térmico.
Proyecto Arquímedes	Proceso térmico realizado en líquidos con el objetivo de reducir la presencia de agentes patógenos que puedan contener.
Radiación solar directa	La radiación solar que proviene directamente del sol.
Reaccion endotérmica	Son aquellas reacciones que absorben energía en forma de calor.
Reacción eutéctica	Constituye la transformación de solidificación completa del líquido. Este tipo de reacción corresponde en un punto fijo en el diagrama de fases, ocurre a una temperatura y composición determinadas, y dicho punto posee cero grados de libertad.
Reacción exotérmica	Son aquellas reacciones que desprenden energía, ya sea como luz o calor, o lo que es lo mismo, con una variación negativa de la entalpía.

---

Receptor	Elemento que recibe la energía solar.
Sal covalente	Compuesto químico formador por cationes enlazados a aniones mediante un enlace iónico. Predomina el enlace covalente.
Sal iónica	Compuesto químico formador por cationes enlazados a aniones mediante un enlace iónico. Predomina el enlace iónico.
Sublimación	Es el proceso que consiste en el cambio de estado de sólido a estado gaseoso sin pasar por el estado líquido.
Termoquímica	Estudio de las transformaciones que sufre la energía calorífica en las reacciones químicas.
Therminol VP-1	Es un fluido de transferencia de calor sintético de temperatura muy alta diseñado para satisfacer los exigentes requisitos de los sistemas de fase de vapor o los sistemas de fase líquida.



---